

**João Batista Ramos Côrtes**

**ANÁLISE DA ESTABILIDADE GEOMÉTRICA DE CÂMARAS  
DIGITAIS DE BAIXO CUSTO COM DIFERENTES MÉTODOS DE  
CALIBRAÇÃO**

**Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do Título de Doutor em Ciências Geodésicas.**

**Orientador: Prof. Dr. Edson A. Mitishita**

**CURITIBA  
AGOSTO 2010**

Esse trabalho pode ser reproduzido parcialmente ou na sua totalidade desde que preservada a fonte de origem

C787 Côrtes, João Batista Ramos.

Análise da estabilidade geométrica de câmaras digitais de baixo custo com diferentes métodos de calibração / João Batista Ramos Côrtes. – Curitiba : UFP, 2010.  
144 p. : il.

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Ciências Geodésicas.

Orientador: Prof. Dr. Edson A. Mitishita.

1. Estabilidade geométrica. 2. Câmaras digitais. 3. Métodos de calibração. I. Título.  
CDD 22<sup>a</sup> ed. 551

Ficha catalográfica elaborada pelo Bibliotecário Arnaldo Alves Ferreira Júnior – CRB1/2092  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.  
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza.

## TERMO DE APROVAÇÃO

JOÃO BATISTA RAMOS CÔRTEZ

“ANÁLISE DA ESTABILIDADE GEOMÉTRICA DE CÂMARAS DIGITAIS DE BAIXO CUSTO COM DIFERENTES MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO”

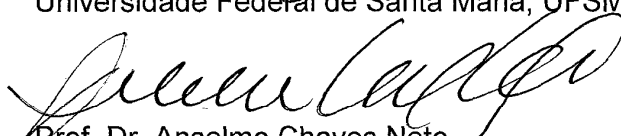
Tese nº 72 aprovada como requisito parcial do grau de Doutor no Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra da Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientador:


  
Prof. Dr. Edson Aparecido Mitishita  
Departamento de Geomática, UFPR

  
Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli  
Universidade Estadual Paulista, UNESP

  
Prof. Dr. Roosevelt de Lara Santos Junior  
Universidade Federal de Santa Maria, UFSM

  
Prof. Dr. Anselmo Chaves Neto  
Departamento de Estatística, UFPR

  
Prof. Dr. Alvaro Muriel Lima Machado  
Departamento de Geomática, UFPR

  
Prof. Dr. Quintino Dalmolin  
Departamento de Geomática, UFPR

Curitiba, 30 de agosto de 2010.

## **DEDICATÓRIA**

**Dedico esse trabalho à família, maior patrimônio de um ser humano:  
Sr Zizi (*in memorian*), Dona Rosa, Itagiba, Ilka, Daniel, Gislene, Miriam,  
Marcos, Amanda, Ítalo, Melissa, Lukas, João Pedro e Mateus.**

**E à minha amada Sarah...  
O meu eterno adeus**

## AGRADECIMENTOS

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás (IFG)

À Coordenação de Geomática

Ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC - UFPR)

Aos professores e técnicos do CPGCG e Departamento de Geomática

Aos amigos:

Ana Paula, Ângela, Avilmar, Betina, Bruna, Bueno, Carolina, Débora, Dirce, Diuliana, Ernesto, Eugênio, Fabiana, Fábio, Fernanda, Glauber, João Tavares, John Alejandro, Júlia, Júlio Dito, Júlio Van, Karina, Leonardo, Marcis, Maria Aparecida, Mariana, Mariney, Marlo, Micheley, Mikozs, Mônica, Mosar, Niarkios, Nilson, Nilton, Ricardo, Rogers, Rosângela, Schimalski, Sílvio, Sydney, Valdeir, Vaneza, Wagner e Zuleica.

Às pessoas que direta ou indiretamente contribuíram com a minha formação moral e cultural em qualquer etapa de minha vida.

Agradeço especialmente:

Ao amigo e companheiro Mitishita pela dedicação, paciência, esforço, por ajudar a termos um mundo melhor e por provar que na vida há muito mais que *tapaços*.

À Maria Cristina, Maria de Jesus e Shirley-Mar, pela colaboração nesse trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DAS FIGURAS	8
LISTA DE SIGLAS	14
RESUMO	15
ABSTRACT	16
1 INTRODUÇÃO	17
1.1 Objetivo Geral	19
1.2 Objetivos Específicos	19
1.3 Justificativa	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Fotogrametria	22
2.1.1 Sistemas de Coordenadas em Fotogrametria	22
2.1.2 Equação de Colinearidade	25
2.1.3 Erros Sistemáticos da Imagem Fotográfica	26
2.1.3.1 Distorções das Lentes	26
2.1.3.1.1 Distorção Radial Simétrica	27
2.1.3.1.2 Distorção Descentrada	27
2.1.3.2 Correção das Distorções das Lentes	28
2.1.4 Calibração de Câmaras	29
2.1.5 Aerotriangulação	32
2.1.6 Precisão Altimétrica Esperada	34
2.1.7 Estado da Arte da Temática de Pesquisa	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1 Materiais	38
3.1.1 Programas ou Softwares	38
3.1.2 Equipamentos	39
3.1.2.1 Computador	39
3.1.2.2 Câmaras Digitais	39
3.1.2.2.1 Câmara Kodak DCS Pro 14n	39
3.1.2.2.2 Câmara Sony DSC F828	40
3.1.2.3 Estação Total	41
3.1.2.4 Receptor de Sinais GPS	42

3.1.2.5 Campos de Calibração	42
3.1.2.5.1 Campo de Calibração Terrestre Plano Parede	42
3.1.2.5.2 Campo de Calibração Terrestre Tridimensional Gabião	44
3.1.2.5.3 Campo de Calibração Tridimensional Bacacheri	46
3.1.3 Tomadas das Fotografias nos Processos de Calibração	49
3.1.3.1 Configuração da Câmara Kodak DCS Pro 14n	49
3.1.3.2 Configuração da Câmara Sony DSC F828	50
3.2 Metodologia	50
3.2.1 Recuperação da Geometria Projetiva	51
3.2.1.1 Calibração Terrestre	51
3.2.1.2 Calibração Usando Fotografias Aéreas	53
3.2.1.2.1 Calibração Usando Fotografias Aéreas com Altura de Voo Diferente	53
3.2.1.2.2 Calibração Com Fotografias Aéreas Inclínadas	54
3.2.1.3 Calibração a Frio	55
3.2.2 Análise da Estabilidade	56
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1 Resultados da Calibração da câmara kodak DCS Pro 14n	58
4.2 Análise Da Estabilidade Da Geometria Projetiva Da Câmara Kodak DCS Pro 14n	67
4.3 Resultados da Calibração da câmara Sony DSC F828	80
4.4 Análise da Estabilidade da Geometria Projetiva da Câmara Sony DSC F828	89
5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	103
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
Anexo 1 - Tabela do Coeficiente de Correlação - FILLIBEN	111
Apêndice 1 - Numeração e Coordenadas dos Alvos do Campo de Calibração Plano Parede	113
Apêndice 2 - Coordenadas dos Alvos Pré-Sinalizados no Campo de Calibração Bacacheri	115
Apêndice 3 - Procedimento Para a Tomada das Fotografias Com Temperatura de 3°C	118
Apêndice 4 - Teste de Normalidade Para os Parâmetros Recuperados da Geometria Projetiva da Câmara KODAK DCS Pro 14n.	119
Apêndice 5 - Precisão Altimétrica Esperada Para as Aerotriangulações- Câmara Kodak.	123

Apêndice 6 - Discrepâncias Obtidas Entre as Coordenadas Oriundas das Diversas Aerotriangulações Com as Determinadas por Levantamento Geodésico (GPS) - Câmara Kodak	124
Apêndice 7 - Cálculo da Estatística do Teste "t" para a Hipótese Nula $H_0 : \mu \leq 0,225$ para os Erros Planimétricos e Altimétricos - Câmara Kodak	126
Apêndice 8 - Teste de Hipótese - De Que a Média Planimétrica da População é Igual ou Menor que a Resolução do Pixel no Terreno - Câmara Kodak	128
Apêndice 9 - Teste de Normalidade Para os Parâmetros Recuperados da Geometria Projetiva da Câmara Sony DSC F828	130
Apêndice 10 - Precisão Altimétrica Esperada Para as Aerotriangulações - Câmara Sony	134
Apêndice 11 - Discrepâncias Obtidas Entre as Coordenadas Oriundas das Diversas Aerotriangulações Com as Determinadas por Levantamento Geodésico (GPS) - Câmara Sony	135
Apêndice 12 - Limite Superior da Média da População dos Erros Planimétricos e Altimétricos - Câmara Sony	137
Apêndice 13 - Cálculo da Estatística do Teste "t" Para a Hipótese Nula $H_0 : \mu \leq 0,20$ Para os Erros Planimétricos e Altimétricos - Câmara Sony	139



## LISTA DAS FIGURAS

FIGURA 1 - SISTEMAS DE COORDENADAS DE <i>PIXEL</i> E CENTRAL À IMAGEM...	24
FIGURA 2 - RELAÇÃO DE COLINEARIDADE ENTRE UM PONTO OBJETO E IMAGEM.....	25
FIGURA 3 - ESQUEMA DAS ESTAÇÕES DE TOMADAS DAS FOTOGRAFIAS PARA A CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS PELO MÉTODO DAS CÂMARAS CONVERGENTES .....	30
FIGURA 4 - DIREÇÃO E SENTIDO DAS LINHAS DE VOO PARA A CALIBRAÇÃO. ....	31
FIGURA 5 - BLOCO FOTOGRAMÉTRICO COM A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO .....	33
FIGURA 6 - MODELOS MAIS COMUNS DE ALVOS PRÉ-SINALIZADOS .....	33
FIGURA 7 - CÂMARA KODAK DCS PRO 14N COM SUAS DIMENSÕES .....	40
FIGURA 8 - CÂMARA SONY DSC F828 COM SUAS DIMENSÕES .....	41
FIGURA 9 - FOTOGRAFIA DO CAMPO DE CALIBRAÇÃO TERRESTRE PLANO PAREDE .....	43
FIGURA 10 - TIPOS DE ALVOS PRÉ-SINALIZADOS UTILIZADOS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO TERRESTRE PLANO PAREDE.....	43
FIGURA 11 - NUMERAÇÃO DOS ALVOS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO TERRESTRE PLANO PAREDE.....	44
FIGURA 12 - DIMENSÕES DO CAMPO DE CALIBRAÇÃO TERRESTRE TRIDIMENSIONAL GABIÃO .....	45
FIGURA 13 - CAMPO DE CALIBRAÇÃO TERRESTRE TRIDIMENSIONAL GABIÃO .....	45
FIGURA 14 - MODELO DE ALVO UTILIZADO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO GABIÃO .....	46
FIGURA 15 - DISTRIBUIÇÃO DOS ALVOS PRÉ-SINALIZADOS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO AÉREO TRIDIMENSIONAL BACACHERI .....	47
FIGURA 16A - IMPLANTAÇÃO DE ALVOS PRÉ-SINALIZADOS.....	48
FIGURA 16B - ALVO PRÉ-SINALIZADO .....	48
FIGURA 17 - ESTAÇÕES DE TOMADA DAS FOTOGRAFIAS E ROTAÇÕES DA CÂMARA EM CADA ESTAÇÃO. ....	52

FIGURA 18 - SENTIDO E DIREÇÃO DE VOO PLANEJADO PARA A TOMADA DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS COM ALTURAS DE VOO DIFERENTES. ....	54
FIGURA 19 - SENTIDO E DIREÇÃO DE VOO PLANEJADO PARA A TOMADA DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS INCLINADAS. ....	55
FIGURA 20 - SENTIDO E DIREÇÃO DE VOO REALIZADOS PARA A TOMADA DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS COM ALTURAS DIFERENTES. ....	59
FIGURA 21 - DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA DA CÂMARA KODAK PARA AS CALIBRAÇÕES REALIZADAS EM 2006, 2007, 2009 .....	69
FIGURA 23 - GRÁFICO DAS DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS OBTIDAS DAS AEROTRIANGULAÇÕES REALIZADAS. ....	72
FIGURA 24 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS OBTIDAS NAS CINCO AEROTRIANGULAÇÕES .....	76
FIGURA 25 - ORIENTAÇÕES POSTAS NA CÂMARA EM CADA FAIXA DE VOO REALIZADA .....	81
FIGURA 26 - EXEMPLO DE UMA FOTOGRAFIA INCLINADA EMPREGADA NA CALIBRAÇÃO .....	82
FIGURA 27 - DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA DA CÂMARA SONY PARA AS CALIBRAÇÕES REALIZADAS. ....	91
FIGURA 28 - ESQUEMA DO BLOCO AEROTRIANGULADO, MOSTRANDO OS PONTOS DE APOIO E DE LIGAÇÃO.....	92
FIGURA 29 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS ENTRE AS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO OBTIDAS COM GPS COM AS COORDENADAS OBTIDAS POR AEROTRIANGULAÇÃO .....	95
FIGURA 30 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS OBTIDAS NAS SETE AEROTRIANGULAÇÕES .....	99
FIGURA 31 - ORIENTAÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS DO CAMPO DE CALIBRAÇÃO PAREDE. ....	114
FIGURA 32 - GRÁFICO DA CURVA QQPLOT PARA AS DISTÂNCIAS FOCALIS - CÂMARA KODAK .....	120
FIGURA 33 - GRÁFICO DA CURVA QQPLOT PARA AS DISTÂNCIAS FOCALIS - CÂMARA SONY.....	121

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - MODELO DA CÂMARA, DATA DA TOMADA DAS FOTOGRAFIAS E CAMPO USADO PARA A CALIBRAÇÃO .....	52
TABELA 2 - DADOS DO VOO REALIZADO PARA A CALIBRAÇÃO DA CÂMARA KODAK COM ALTURAS DE VOO DIFERENTE.....	60
TABELA 3 - PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR SIGNIFICATIVOS NAS DIVERSAS CALIBRAÇÕES E VARIÂNCIA <i>A POSTERIORI</i> DO AJUSTAMENTO, COMO TAMBÉM O CAMPO DE CALIBRAÇÃO UTILIZADO E A DATA DE TOMADAS DAS FOTOGRAFIAS.....	61
TABELA 4 - RESULTADOS OBTIDOS NO TESTE DE QUI-QUADRADO ( $\chi^2$ ) NA VERIFICAÇÃO DAS IGUALDADES DE VARIÂNCIAS RESULTANTES NAS CINCO CALIBRAÇÕES REALIZADAS COM A CÂMARA KODAK .....	61
TABELA 5 - ERROS QUADRÁTICOS MÉDIOS DOS RESÍDUOS DAS FOTOCOORDENADAS E DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO, RESULTANTES DAS CALIBRAÇÕES REALIZADAS COM A CÂMARA KODAK .....	62
TABELA 6 - CORRELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR DETERMINADOS NAS CALIBRAÇÕES REALIZADAS COM A CÂMARA KODAK .....	63
TABELA 7 - MÉDIAS EM MÓDULOS DOS VALORES DAS CORRELAÇÕES ESTATÍSTICAS ENTRE OS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR E EXTERIOR DETERMINADAS NAS CALIBRAÇÕES REALIZADAS. - CÂMARA KODAK.....	64
TABELA 8 - VALORES DOS ÂNGULOS ÔMEGA, PHI E KAPPA DAS IMAGENS EMPREGADAS NAS CALIBRAÇÕES P_6_1 N, P_7_1 N, P_9_1 N E G_9_1 N. ....	66
TABELA 9 - RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO ESTATÍSTICA DA IGUALDADE DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR NAS CALIBRAÇÕES REALIZADAS.....	68
TABELA 10 - PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS NAS AEROTRIANGULAÇÕES REALIZADAS COM A CÂMARA KODAK .....	70
TABELA 11 - DISCREPÂNCIAS EM PLANIMETRIA E ALTIMETRIA OBTIDAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO.....	71

TABELA 12 - VALORES DA MÉDIA ESTIMADA DA EXATIDÃO ALTIMÉTRICA POPULACIONAL PARA CADA AEROTRIANGULAÇÃO .....	73
TABELA 13 - RESULTADO DO TESTE DE HIPÓTESE - $\mu \leq 0,588$ .....	74
TABELA 14 - VALORES DA MÉDIA ESTIMADA DA EXATIDÃO PLANIMÉTRICA POPULACIONAL PARA CADA AEROTRIANGULAÇÃO .....	77
TABELA 15 - RESULTADO DO TESTE DE HIPÓTESE - $\mu \leq 0,225$ .....	77
TABELA 16 - ERRO QUADRÁTICO MÉDIO DETERMINADO NAS POSIÇÕES E ATITUDES DA CÂMARA NAS CINCO AEROTRIANGULAÇÕES REALIZADAS COM A CÂMARA KODAK.....	79
TABELA 17 - PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR SIGNIFICATIVOS OBSERVADOS NAS DIVERSAS CALIBRAÇÕES COM SUAS VARIÂNCIAS, E VARIÂNCIA A PRIORI E A POSTERIORI DO AJUSTAMENTO .....	83
TABELA 18 - RESULTADOS OBTIDOS NO TESTE DE QUI-QUADRADO ( $\chi^2$ ) NA VERIFICAÇÃO DAS IGUALDADES DE VARIÂNCIAS RESULTANTES NAS SETE CALIBRAÇÕES REALIZADAS COM A CÂMARA SONY .....	83
TABELA 19 ERROS QUADRÁTICOS MÉDIOS DOS RESÍDUOS DAS FOTOCOORDENADAS E DAS COORDENADAS DOS PONTOS DE APOIO, RESULTANTES DAS CALIBRAÇÕES REALIZADAS COM A CÂMARA SONY. .....	84
TABELA 20 - CORRELAÇÕES ENTRE OS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR DETERMINADOS NAS CALIBRAÇÕES REALIZADAS COM A CÂMARA SONY .....	85
TABELA 21 - MÉDIAS EM MÓDULOS DOS VALORES DAS CORRELAÇÕES ESTATÍSTICAS ENTRE OS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR E EXTERIOR DETERMINADAS NAS CALIBRAÇÕES REALIZADAS COM A CÂMARA SONY .....	86
TABELA 22 - VALORES DOS ÂNGULOS DE ATITUDE DAS FOTOGRAFIAS USADAS NAS CALIBRAÇÕES DA CÂMARA SONY .....	88
TABELA 23 - RESULTADOS DA VERIFICAÇÃO ESTATÍSTICA DA IGUALDADE DOS PARÂMETROS DE ORIENTAÇÃO INTERIOR NAS CALIBRAÇÕES REALIZADAS.....	89
TABELA 24 - PRINCIPAIS RESULTADOS OBTIDOS NAS AEROTRIANGULAÇÕES REALIZADAS COM A CÂMARA SONY .....	93

TABELA 25 - DISCREPÂNCIAS EM PLANIMETRIA E ALTIMETRIA OBTIDAS NOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO – CÂMARA SONY .....	94
TABELA 26 - VALORES DA MÉDIA DA EXATIDÃO ALTIMÉTRICA POPULACIONAL ESTIMADA PARA CADA AEROTRIANGULAÇÃO - CÂMARA SONY .....	96
TABELA 27 - RESULTADO DO TESTE DE HIPÓTESE - $\mu \leq 0,741$ .....	97
TABELA 28 - ESTIMATIVA DA MÉDIA DA POPULAÇÃO DO ERRO PLANIMÉTRICO E ALTIMÉTRICO PARA CADA CALIBRAÇÃO .....	101
TABELA 29 - RESULTADO DO TESTE DE HIPÓTESE - $\mu \leq 0,20$ .....	101
TABELA 30 - ERRO QUADRÁTICO MÉDIO DETERMINADO NAS POSIÇÕES E ATITUDES DA CÂMARA NAS CINCO FOTOGRAFIAS USADAS NAS AEROTRIANGULAÇÕES REALIZADAS COM A CÂMARA SONY. ....	102
TABELA 31 - COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO PARA O TESTE DE FILLIBEN. ....	111
TABELA 32 - NUMERAÇÃO E COORDENADAS CARTESIANAS DOS ALVOS DO CAMPO DE CALIBRAÇÃO PAREDE .....	113
TABELA 33 - COORDENADAS DOS ALVOS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO BACACHERI .....	115
TABELA 34 - VALORES PARCIAIS PARA O COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE FILLIBEN PARA A DISTÂNCIA FOCAL.....	119
TABELA 35 - VALORES PARCIAIS PARA O COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE FILLIBEN PARA O AFASTAMENTO DO PONTO PRINCIPAL NO EIXO X ....	120
TABELA 36 - VALORES PARCIAIS PARA O COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE FILLIBEN PARA O AFASTAMENTO DO PONTO PRINCIPAL NO EIXO "Y"..	121
TABELA 37 - CÁLCULO DAS DISCREPÂNCIAS ENTRE AS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO OBTIDAS COM LEVANTAMENTO GEODÉSICO E AS DETERMINADAS PELA AEROTRIANGULAÇÃO - CÂMARA KODAK ..	124
TABELA 38 - VALORES PARCIAIS PARA O COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE FILLIBEN PARA A DISTÂNCIA FOCAL.....	130
TABELA 39 - VALORES PARCIAIS PARA O COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DE FILLIBEN PARA O AFASTAMENTO DO PONTO PRINCIPAL NO EIXO X ....	131
TABELA 40 - VALORES PARCIAIS PARA O CÁLCULO DO COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO DO TESTE DE FILLIBEN PARA O AFASTAMENTO DO PONTO PRINCIPAL NO EIXO "Y " .....	132

TABELA 41 - CÁLCULO DAS DISCREPÂNCIAS ENTRE AS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO OBTIDAS COM LEVANTAMENTO GEODÉSICO COM AS ORIUNDAS DAS DIVERSAS AEROTRIANGULAÇÃO - CÂMARA SONY .....	135
--	-----

## LISTA DE SIGLAS

B\_9\_1 N - Primeira calibração realizada no ano de 2009 no campo de calibração tridimensional Bacacheri com fotografias aéreas tomadas a temperatura ambiente.

CCD - *Charged Coupled Device*.

CCTB - Campo de Calibração Tridimensional Bacacheri.

CCTPP - Campo de Calibração Terrestre Plano Parede.

CCTTG - Campo de Calibração Terrestre Tridimensional Gabião.

CMOS - *Complementary Metal Oxide Semiconductor*.

G\_9\_1 N - Primeira calibração realizada no ano de 2009 no campo de calibração tridimensional Gabião com fotografias tomadas a temperatura ambiente.

GNSS - *Global Navigation Sattelite System*.

GPS - Sistema de Posicionamento Global.

P\_6\_1 N - Primeira calibração realizada no ano de 2006 no campo de calibração plano parede com fotografias tomadas a temperatura ambiente.

P\_7\_1 N - Primeira calibração realizada no ano de 2007 no campo de calibração plano parede com fotografias tomadas a temperatura ambiente.

P\_8\_1 N - Primeira calibração realizada no ano de 2008 no campo de calibração plano parede com fotografias tomadas a temperatura ambiente.

P\_9\_1 A - Primeira calibração realizada no ano de 2009 no campo de calibração plano Parede com fotografias tomadas a temperatura controlada de 30C.

P\_9\_1 N - Primeira calibração realizada no ano de 2009 no campo de calibração plano Parede com fotografias tomadas a temperatura ambiente.

P\_9\_2 N - Segunda calibração realizada no ano de 2009 no campo de calibração plano parede com fotografias tomadas a temperatura ambiente.

P\_9\_3 N - Terceira calibração realizada no ano de 2009 no campo de calibração plano parede com fotografias tomadas a temperatura ambiente.

POE - Parâmetros de Orientação Exterior.

POI - Parâmetros Orientação Interior.

## RESUMO

Este trabalho de pesquisa teve como principal objetivo o estudo da estabilidade geométrica de duas câmaras de baixo custo, empregando diferentes métodos de calibração. Os parâmetros de orientação interior das duas câmaras, sendo uma Kodak DCS Pro 14n e outra Sony DSC F828, foram determinados por técnicas de calibração terrestres e aéreas. Os resultados obtidos foram analisados e discutidos. Duas metodologias baseadas nos métodos dos campos mistos e das câmaras convergentes foram utilizadas para a realização das calibrações aéreas. Nos campos de calibração terrestres, plano e tridimensional, as calibrações foram realizadas pelo método das câmaras convergentes. As estabilidades geométricas das duas câmaras foram verificadas com base em testes estatísticos que analisaram a homogeneidade dos parâmetros de orientação interior provenientes das calibrações executadas e também da homogeneidade das precisões e exatidões de aerotriangulações realizadas com diferentes parâmetros de orientação interior. Os experimentos realizados mostraram que, para a realização de aerotriangulações planialtimétricas dentro das precisões adotadas, as duas câmaras foram consideradas geometricamente estáveis no período de tempo compreendido entre as calibrações realizadas.

Palavras-chaves: câmara de baixo custo, estabilidade geométrica, calibração de câmara, parâmetros de orientação interior, Campo de calibração.



## **ABSTRACT**

The main objective of this PhD research was the study of geometric stability of two low cost digital cameras, using different methods of calibration. The interior orientation parameters of the two cameras had been determined by terrestrial and aerial techniques of calibration. The Kodak DCS 14n and Sony DSC F828 were the two digital cameras used in this work. The obtained results from all the calibrations performed were analyzed and discussed. Two methodologies based on the methods of the mixing testfield and the cameras convergent had been used to perform the aerial calibrations. Three-dimensional and horizontal were the types of terrestrial testfields that were used to perform all the calibrations experiments by cameras convergent method. The geometric stabilities of the two cameras had been computed via statistical test that analyzed the homogeneity of the parameters of interior orientation from all performed calibrations. In addition, geometric stabilities of two cameras were also performed by other statistical test that verified the homogeneity of the precisions and accuracies from aerial bundle adjustments performed with different sets of the interior orientation parameters. The results from the performed experiments shown that the two cameras analyzed in this research were considered stables to performed aerial bundle adjustment, in the calibrations time periods and inside of the adopted precisions.

**Key Words:** low cost digital camera, geometric stability, camera calibration, interior orientation parameters, calibration testified.

# 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de sensores capazes de gerar imagens com diferentes especificações fez com que a Sociedade Americana de Fotogrametria, em 1979, adequasse a definição de Fotogrametria. Desde então, passou a adotar a seguinte terminologia: "Fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia de obtenção de informações confiáveis sobre objetos físicos e o meio ambiente por meio de processos de gravação, medição e interpretação de imagens fotográficas e padrões de energia eletromagnética radiante e outras fontes".

A câmara fotográfica é o instrumento óptico mais empregado na obtenção de informações métricas na Fotogrametria. Em virtude disso, é fundamental o conhecimento dos parâmetros ou informações que possibilitem a reconstrução da geometria projetiva que descreve a correta trajetória do feixe perspectivo gerador da imagem no instante da tomada. Sem o conhecimento desses parâmetros as medições realizadas na imagem não podem ser modeladas dos erros sistemáticos que afastam a geometria projetiva, inviabilizando a obtenção das informações métricas do espaço objeto dentro das exatidões requeridas nos procedimentos fotogramétricos.

A geometria projetiva de uma câmara é materializada pelos seus parâmetros de orientação interior (POI), determinados por um processo denominado genericamente de calibração de câmara. Os métodos mais comuns de calibração utilizam um conjunto de imagens que são geometricamente tomadas de um local especialmente preparado com um grupo de alvos pré-sinalizados com coordenadas tridimensionais rigorosamente determinadas, conhecido como Campo de Calibração. Analiticamente, os parâmetros de orientação interior são determinados através de um ajustamento simultâneo por feixes de raios perspectivos, usando o método dos mínimos quadrados acrescido de injunções de posição nas coordenadas dos pontos pré-sinalizados e dos modelos matemáticos que corrigem os afastamentos da condição de colinearidade dos raios de luz. Esse método é conhecido como autocalibração.

Em Fotogrametria, as câmaras, usualmente são classificadas como câmaras métricas e não métricas. As primeiras são normalmente conhecidas como câmaras

fotogramétricas, e as segundas como câmaras de pequeno formato ou câmaras de baixo custo ou ainda câmaras não fotogramétricas.

O constante e crescente desenvolvimento dos materiais eletrônicos e da informática tem proporcionado, cada vez mais, o aumento da resolução do elemento sensor denominado *Charged Coupled Device* (CCD) e do *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS). Associado a esse desenvolvimento, as facilidades operacionais e o baixo custo tem contribuído para a elevada popularização das câmaras digitais não fotogramétricas e a sua maior utilização em projetos de engenharia.

As câmaras métricas são construídas para terem alta estabilidade geométrica e apresentarem baixas distorções da imagem gerada e distância focal fixa. Por outro lado, para uma câmara não métrica, o importante é que a fotografia tenha boa qualidade visual, independentemente do grau de distorções existentes na imagem. No processo de construção e montagem de uma câmara não métrica, não existe a preocupação de manter fixa a geometria projetiva, pois a distância focal pode facilmente ser alterada, pela movimentação do anel de focagem, em função da distância do objeto a ser fotografado, otimizando desta forma, a qualidade visual da imagem gerada. A impossibilidade de retornar a mesma distância focal, determinada no momento da calibração, altera os outros parâmetros de orientação interior e dificulta a exata recuperação da geometria projetiva, impossibilitando a correta correção dos erros sistemáticos da imagem e menor exatidão das informações métricas obtidas no processo fotogramétrico.

Câmaras não métricas possuem outras características que podem modificar a geometria projetiva determinada num processo de calibração, tais como: sistemas de absorção de impacto que modificam a posição do elemento sensor em relação ao sistema de lentes; trocas de objetiva; auto-rotação de imagens, autofoco e zoom digital.

Além desses fatores mencionados, fatores operacionais podem alterar a estabilidade geométrica de uma câmara? Surgem então as seguintes questões. A diferença de temperatura existente entre a tomada das fotografias, para a calibração terrestre e a tomada das fotografias aéreas pode causar instabilidade na geometria projetiva? As alterações na geometria projetiva existentes num dado período de tempo entre calibrações podem modificar a qualidade das informações fotogramétricas obtidas? A geometria projetiva recuperada a partir de fotografias

tomadas de um campo de calibração aéreo é melhor que a recuperada com base num campo de calibração terrestre? A geometria projetiva recuperada usando um campo tridimensional terrestre é melhor do que a obtida em um campo terrestre plano? Os vários métodos de recuperação da geometria projetiva possibilitam a obtenção de resultados semelhantes?

Com o objetivo de responder a esses questionamentos, procurou-se no presente trabalho recuperar a geometria projetiva de duas câmaras não métricas com diferentes métodos de calibração e verificar suas estabilidades geométricas entre os períodos de calibrações. As verificações de estabilidades foram baseadas nas análises estatísticas dos resultados obtidos com diferentes calibrações, como também das análises dos resultados obtidos nas aerotriangulações realizadas com diferentes parâmetros de orientação interior e das discrepâncias obtidas num conjunto de pontos de verificação pré-sinalizados, cujas coordenadas geodésicas foram determinadas por aerotriangulação e por levantamento empregando o Sistema de Posicionamento Global (GPS).

## 1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é analisar a estabilidade geométrica de duas câmaras digitais de baixo custo com diferentes metodologias de calibração.

## 1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos a serem obtidos são:

- avaliar o desempenho da recuperação da geometria projetiva usando campo de calibração terrestre plano versus campo calibração terrestre tridimensional;
- avaliar a significância da variação dos parâmetros de orientação interior submetendo a câmara a uma acentuada variação de

temperatura no momento da tomada das fotografias para a calibração;

- avaliar se a variação dos parâmetros de orientação interior entre períodos de calibração é significativa para alterar a qualidade do produto fotogramétrico;
- avaliar o desempenho da recuperação dos parâmetros de orientação interior usando fotografias terrestres tomadas em campo de calibração terrestre (plano ou tridimensional) versus a recuperação dos parâmetros de orientação interior (POI) usando fotografias aéreas tomadas em um campo de calibração tridimensional;
- avaliar a estabilidade geométrica da câmara Kodak DCS Pro 14n no período de 16/11/2006 a 14/05/2009, ou seja, no período de 2 anos e 9 meses;
- avaliar a estabilidade geométrica da câmara Sony DSC F828 no período de 16/12/2008 a 08/06/2009, ou seja, no período de 6 meses;

### 1.3 Justificativa

Segundo Gonçalves (2006), o número de levantamentos aerofotogramétricos, no Brasil, é irrisório se comparado com o realizado em outros países do hemisfério norte. O principal motivo desse reduzido número de aerolevantamentos é o valor cobrado pelos produtos e serviços fotogramétricos.

O emprego de câmaras digitais de baixo custo pode ser uma alternativa econômica para a realização de levantamentos aerofotogramétricos em pequenas áreas. Para que o produto fotogramétrico produzido com este tipo de sensor óptico tenha a qualidade requerida, torna-se necessário um processo de calibração que possibilite a determinação dos parâmetros de orientação interior.

Porém, apenas a determinação dos parâmetros de orientação interior será de pouca valia se a câmara não possuir a estabilidade geométrica requerida. Portanto, a correta utilização de uma câmara de baixo custo na Fotogrametria não dependerá somente dos parâmetros matemáticos que possibilitem a recuperação da geometria

projetiva, mas também do conhecimento da sua estabilidade geométrica num dado período de utilização.

Assim, é de primordial importância, nos dias atuais, a realização de pesquisas voltadas para o desenvolvimento de metodologias que melhorem e aperfeiçoem cada vez mais as técnicas empregadas para a determinação dos parâmetros de orientação interior de uma câmara não fotogramétrica, como também dos procedimentos que viabilizem a verificação de sua estabilidade geométrica.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na revisão bibliográfica, inicialmente, serão apresentados os aspectos básicos da Fotogrametria, abordando tópicos sobre os sistemas de coordenadas no espaço da imagem, erros sistemáticos envolvidos na minimização dos afastamentos da condição de colinearidade, calibração de câmaras e aerotriangulação.

Na segunda parte da revisão bibliográfica, será apresentado o estado da arte da temática de pesquisa.

### 2.1 Fotogrametria

Na revisão sobre Fotogrametria, será abordado o seu conceito e os aspectos básicos necessários para a realização das medidas de pontos fotogramétricos empregados nos procedimentos de calibração de câmaras e de aerotriangulação.

#### 2.1.1 Sistemas de Coordenadas em Fotogrametria

Nas aplicações fotogramétricas onde estão envolvidas as transformações entre sistemas de coordenadas, dois são os principais espaços envolvidos: o da imagem e do objeto.

Segundo Lugini (1987), o espaço imagem é a região compreendida entre o ponto nodal posterior do sistema de lentes e o plano no qual a imagem é formada. A região compreendida entre o ponto nodal anterior e a superfície do terreno, o espaço objeto.

Conforme as leis da física, todo raio de luz que é coincidente com o eixo óptico de uma lente ou sistema de lentes não sofre desvio em sua trajetória ao atravessá-la. Valendo-se dessa propriedade física, definiu-se como ponto principal de uma fotografia o ponto fotossensível onde se projeta o eixo óptico do sistema de lentes.

Nas câmaras métricas o sistema fiducial é materializado a partir das marcas fiduciais fixas no plano focal. As coordenadas do ponto principal são geralmente conhecidas neste referencial. Essas informações são imprescindíveis para a correção do trabalho do filme e do afastamento do ponto principal, nas observações fotogramétricas.

Em imagens digitais, o referencial de coordenadas do *pixel*, tem a sua origem definida no canto superior esquerdo da imagem. Esse referencial é levógiro com o eixo das abscissas (x) coincidente com a primeira linha da imagem, e o eixo das ordenadas (y), coincidente com a primeira coluna.

Os elementos sensíveis (CCD ou CMOS) em câmaras digitais são geralmente considerados planos e sem deformações. Também em muitas aplicações fotogramétricas, a sua posição pode ser considerada como sendo invariável em relação ao sistema de lentes. Estas características físicas permitem considerar que o centro do elemento sensor seja coincidente com a origem de um referencial de coordenadas de imagem, dextrógiro, eixo ox orientado positivamente para o sentido de voo e eixo oy com orientação positiva a 90° no sentido anti-horário, a partir do eixo ox. As coordenadas do ponto em linha e coluna são transformadas, para esse sistema de coordenadas, em milímetros com a equação (1), considerando a codificação de uma imagem digital como apresentado na Figura 1. Obtendo-se as coordenadas do ponto principal por um processo de calibração de câmara, as coordenadas no referencial de imagem em milímetros são transformadas para o referencial fotogramétrico em milímetros com as equações (2) e (3), apresentadas e discutidas em Gonçalves (2006).

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_L & 0 \\ 0 & -p_C \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \text{col} - \left( \frac{N_C - 1}{2} \right) \\ \text{lin} - \left( \frac{N_L - 1}{2} \right) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Onde:

$x', y'$  - Coordenadas no referencial de imagem em milímetro;

$p_L$  e  $p_C$  - Tamanho do *pixel* na linha e coluna respectivamente, em milímetro;

col, lin - Coordenada do ponto em linha e coluna;



$N_c$  - Número máximo de colunas da imagem;

$N_l$  - Número máximo de linhas da imagem.

$$x = x' - x_0 \quad (2)$$

$$y = y' - y_0 \quad (3)$$

Onde:

$x$  e  $y$  - Coordenadas no sistema fotogramétrico em mm;

$x_0$  e  $y_0$  - Coordenadas do ponto principal em mm;

$x'$  e  $y'$  - Coordenadas no sistema de imagem em mm.

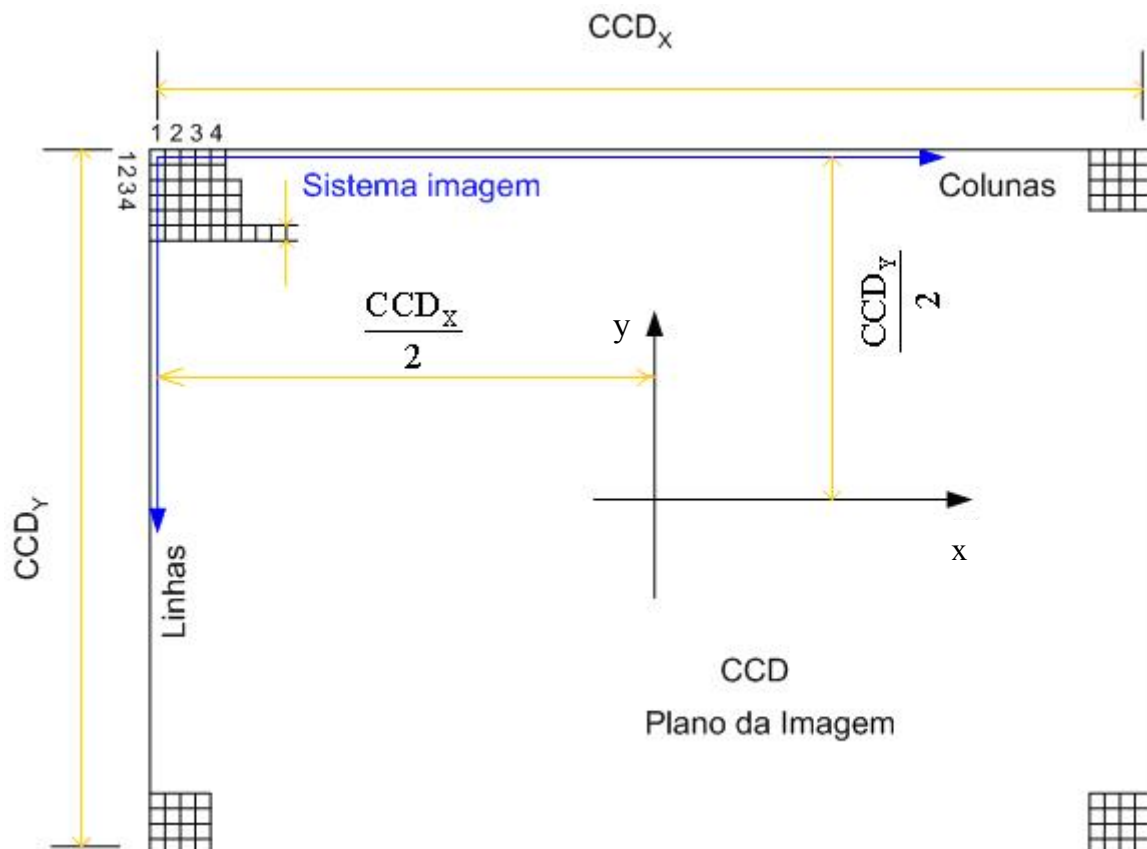


FIGURA 1 - SISTEMAS DE COORDENADAS DE *PIXEL* E CENTRAL À IMAGEM  
FONTE: GONÇALVES (2006).

### 2.1.2 Equação de Colinearidade

Pode-se dizer que a equação de colinearidade é o modelo matemático mais utilizado em Fotogrametria analítica e digital, pois possibilita o relacionamento matemático do ponto imagem com o ponto objeto. Seu desenvolvimento baseia-se na condição teórica de que o ponto imagem, o centro de projeção e o ponto objeto são colineares, ou seja, o raio de luz refletido pelo ponto objeto propaga-se em linha reta até sensibilizar o ponto no plano da imagem (MOFFITT, 1980), conforme apresentado na Figura 2.

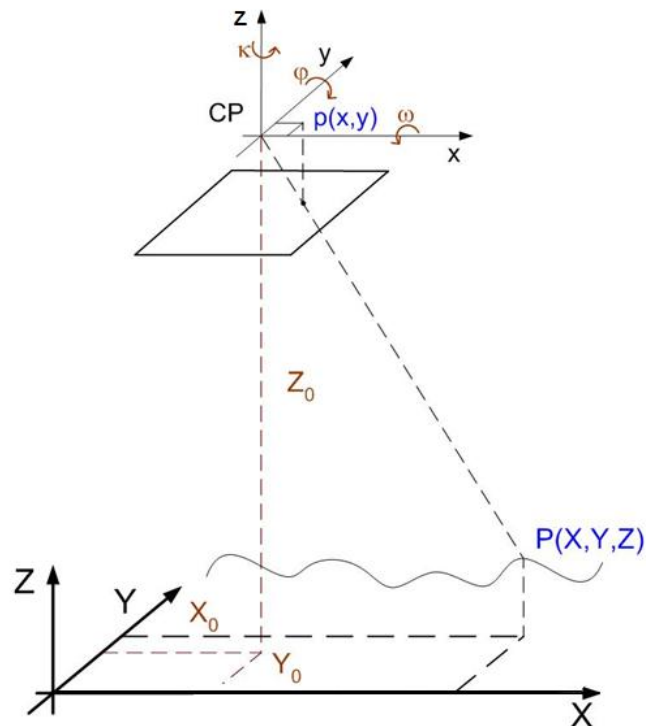


FIGURA 2 - RELAÇÃO DE COLINEARIDADE ENTRE UM PONTO OBJETO E IMAGEM  
FONTE: O Autor.

Logo, a equação de colinearidade é dada pelas equações (4) e (5).

$$x_p = -f \frac{m_{11} \cdot (X - X_0) + m_{12} \cdot (Y - Y_0) + m_{13} \cdot (Z - Z_0)}{m_{31} \cdot (X - X_0) + m_{32} \cdot (Y - Y_0) + m_{33} \cdot (Z - Z_0)} \quad (4)$$

$$y_p = -f \frac{m_{21} \cdot (X - X_0) + m_{22} \cdot (Y - Y_0) + m_{23} \cdot (Z - Z_0)}{m_{31} \cdot (X - X_0) + m_{32} \cdot (Y - Y_0) + m_{33} \cdot (Z - Z_0)} \quad (5)$$

Onde:

$x_p$  e  $y_p$  - Coordenadas no sistema fotogramétrico em mm;

$f$  - Distância focal calibrada em mm;

$m_{ij}$  - Elementos da matriz de rotação  $M$  dada pelas equações (6) e (7);

$X_0, Y_0, Z_0$  - Coordenadas do centro perspectivo da imagem no espaço objeto;

$X, Y, Z$  - Coordenadas de um ponto  $P$  no espaço objeto.

$$M = R_z(\kappa) \cdot R_y(\varphi) \cdot R_x(\omega) \quad (6)$$

$$M = \begin{bmatrix} \cos \varphi \cdot \cos \kappa & \cos \omega \cdot \sin \kappa + \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa & \sin \omega \cdot \sin \kappa - \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \cos \kappa \\ -\cos \varphi \cdot \sin \kappa & \cos \omega \cdot \cos \kappa - \sin \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa & \sin \omega \cdot \cos \kappa + \cos \omega \cdot \sin \varphi \cdot \sin \kappa \\ \sin \varphi & -\sin \omega \cdot \cos \varphi & \cos \omega \cdot \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 2.1.3 Erros Sistemáticos da Imagem Fotográfica

Para a utilização da equação da colinearidade é necessário que o ponto objeto, o centro perspectivo e o ponto imagem sejam colineares, o que não acontece na prática devido aos erros sistemáticos da imagem. Portanto, os afastamentos da condição de colinearidade devem ser minimizados antes de sua aplicação fotogramétrica, adequando assim as condições matemáticas exigidas pelo modelo funcional.

#### 2.1.3.1 Distorções das Lentes

São consideradas aberrações do sistema de lentes todas as perturbações sofridas pelos raios de luz ao atravessar o sistema de lentes que compõe uma objetiva e prejudicam a qualidade visual e geométrica de uma imagem. Seidel, em 1916, estudou e quantificou estas aberrações de imagem e as definiu como sendo as cinco aberrações monocromáticas (aberração esférica, coma, astigmatismo, curvatura de campo e distorção). As quatro primeiras alteram a qualidade visual da imagem, ao passo que a última provoca deslocamentos geométricos na imagem. Maiores detalhes, ver Andrade (2003).

### 2.1.3.1.1 Distorção Radial Simétrica

Essa distorção causa um deslocamento radial simétrico da imagem de sua posição ideal. Segundo Andrade (2003), a distorção radial simétrica pode ser descrita como a parcela não desejada da refração sofrida por um raio luminoso ao atravessar o sistema de lentes de uma câmara. O polinômio utilizado para corrigir a distorção radial simétrica foi apresentado por Conrady em 1919.

As equações de (8) a (10) possibilitam o cálculo da distorção radial simétrica de uma medida no referencial fotogramétrico.

$$\delta x_r = (\kappa_1 \cdot r^2 + \kappa_2 \cdot r^4 + \kappa_3 \cdot r^6) \cdot x \quad (8)$$

$$\delta y_r = (\kappa_1 \cdot r^2 + \kappa_2 \cdot r^4 + \kappa_3 \cdot r^6) \cdot y \quad (9)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (10)$$

Onde:

$\delta x_r$  e  $\delta y_r$  - Componentes da distorção radial simétrica;

$x$  e  $y$  - Coordenadas no sistema fotogramétrico;

$\kappa_1$ ,  $\kappa_2$ , e  $\kappa_3$  - Coeficientes da distorção radial simétrica, obtidos pela calibração da câmara;

$r$  - Distância do ponto principal ao ponto a ser corrigido na imagem.

### 2.1.3.1.2 Distorção Descentrada

Durante o processo de montagem, os elementos que compõe o sistema de lentes de uma objetiva podem ter um pequeno deslocamento, ou inclinação, impedindo assim o perfeito alinhamento dos eixos ópticos das lentes que compõem o sistema de lentes, originando a distorção descentrada. Segundo Conrady (1919), essa distorção é composta pela distorção radial assimétrica e pela distorção tangencial. Brown (1965) e Brown (1966), adaptou o trabalho de Conrady para as aplicações fotogramétricas.

As equações de (11) e (12) possibilitam o cálculo da distorção descentrada para um ponto medido no referencial fotogramétrico.

$$\delta x_d = P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2) + 2 \cdot P_2 \cdot x \cdot y \quad (11)$$

$$\delta y_d = 2 \cdot P_1 \cdot x \cdot y + P_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot y^2) \quad (12)$$

Onde:

$\delta x_d$  e  $\delta y_d$  - Componentes da distorção descentrada;

$x$  e  $y$  - Coordenadas no sistema fotogramétrico;

$P_1$  e  $P_2$  - Parâmetros matemáticos que descrevem a distorção descentrada, obtidos pela calibração da câmara.

#### 2.1.3.2 Correção das Distorções das Lentes

As coordenadas no sistema fotogramétrico corrigidas das distorções das lentes são calculadas pelas equações (13) e (14).

$$x_p = x - \delta x_r - \delta x_d \quad (13)$$

$$y_p = y - \delta y_r - \delta y_d \quad (14)$$

Onde:

$x_p$  e  $y_p$  - Coordenadas no sistema fotogramétrico corrigidas das distorções da imagem;

$x$  e  $y$  - Coordenadas no sistema fotogramétrico;

$\delta x_r$  e  $\delta y_r$  - Componentes da distorção radial simétrica;

$\delta x_d$  e  $\delta y_d$  - Componente da distorção descentrada.

#### 2.1.4 Calibração de Câmaras

Segundo Eisenhart<sup>1</sup> (1963) *apud* Olivas (1980) calibrar é uma maneira refinada de realizar medidas. As medições devem ser repetitivas e executadas de modo a se obter um valor representativo da grandeza observada, bem como a sua precisão. Para manter as características do equipamento calibrado, as medições devem ser realizadas em condições ambientais e operacionais semelhantes àquelas que serão empregadas no instante da utilização do equipamento.

De acordo com Andrade (2003), num processo de calibração fundamentado nas equações de colinearidade e num ajustamento onde os parâmetros de orientação interior e exterior de um conjunto de imagens são recuperados simultaneamente, existirá uma forte correlação entre as coordenadas da estação de exposição ( $X_o$ ,  $Y_o$ ,  $Z_o$ ) com os parâmetros de orientação interior ( $x_o$ ,  $y_o$ ,  $f$ ), em fotografias aéreas verticais tomadas sobre terreno plano. Para quebrar essa correlação, esse trabalho de pesquisa empregará os métodos de calibração das câmaras convergentes e dos campos mistos. Clarke e Fryser (1998), fizeram um amplo estudo sobre os métodos de calibração câmaras. Outros métodos de calibração podem ser obtidos em Wolf (2004) e Moffitt (1980).

Dentre os métodos de calibração existentes, o método de calibração das câmaras convergentes é o de mais fácil execução e extremamente robusto em termos de determinação dos parâmetros de orientação interior (ANDRADE, 2003).

Esse método está baseado na obtenção de fotografias de um campo de calibração a partir de três estações distintas. Para quebrar a correlação linear existente entre os parâmetros de orientação interior e os de orientação exterior, o ângulo de convergência entre as estações extremas deverá ser de  $90^0$ . A Figura 3 apresenta a disposição recomendada das estações utilizadas nas tomada das fotografias pelo método das câmaras convergentes.

---

<sup>1</sup> Eisenhart, .C. Realist Evaluation of the Presicion and Accuracy of Instrument Calibration System **Journal of Research of the National Bureau os Standards** C. Engineering and Instrumentation 67C(2): 161-187 apri/jun 1963

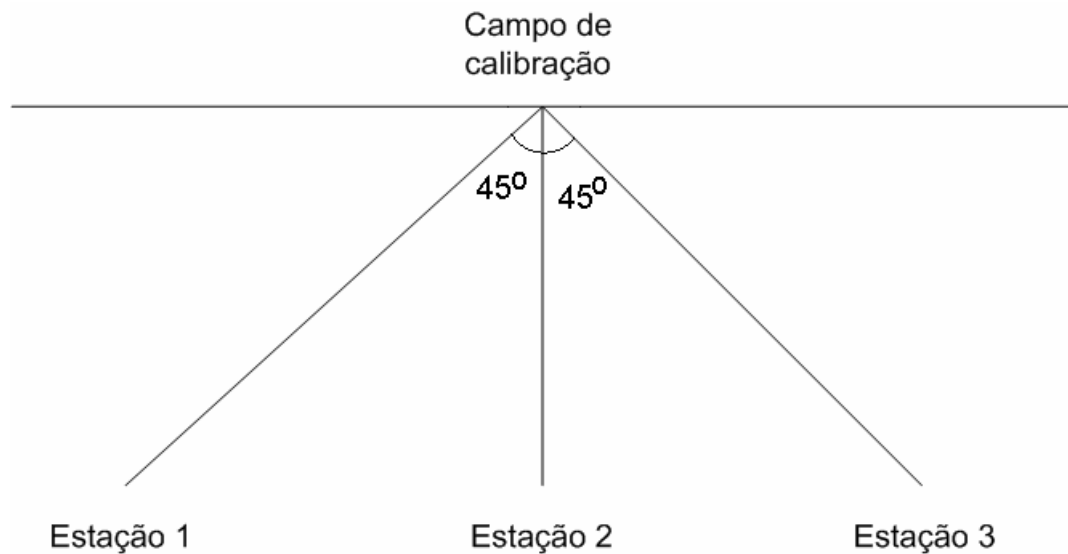


FIGURA 3 - ESQUEMA DAS ESTAÇÕES DE TOMADAS DAS FOTOGRAFIAS PARA A CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS PELO MÉTODO DAS CÂMARAS CONVERGENTES

Fonte: o Autor.

Com o intuito de separar os coeficientes da distorção radial simétrica dos coeficientes da distorção descentrada, é necessário que pelo menos uma fotografia seja tomada com rotação de  $90^\circ$  em torno do eixo  $kappa$ . Portanto são necessárias três fotografias como condição mínima para calibrar uma câmara por este método, sendo duas fotografias convergentes entre si com ângulo de  $90^\circ$  e uma com giro de  $90^\circ$  em relação às outras (ANDRADE, 2003).

A grande vantagem dos métodos de calibração que utilizam fotografias aéreas, como no método dos campos mistos, é que os parâmetros de orientação interior de uma câmara podem ser recuperados nas mesmas condições das tomadas das fotografias para o aerolevanteamento.

O método dos campos mistos baseia-se na variação da altitude dos pontos, como maneira de quebrar a correlação linear existente entre os parâmetros de orientação interior e os parâmetros de orientação exterior. Por este motivo, a correlação linear pode ser quebrada tomando fotografia em um terreno acidentado. A determinação dos parâmetros de distorção das lentes exige um campo com um denso conjunto de alvos. Devido à dificuldade de determinação precisa das coordenadas dos alvos num terreno acidentado, antes do advento da geodésia por satélites, a solução encontrada foi a utilização de dois campos de calibração, um plano altamente densificado e outro acidentado com um número reduzido de pontos.

Por exemplo, numa região urbana, os topos das edificações eram usados como sendo um campo acidentado e o terreno como sendo o plano.

O recobrimento aéreo para a calibração utiliza geralmente quatro faixas , sendo tomadas de duas em duas em sentidos opostos e ortogonais, conforme mostrado na Figura 4.

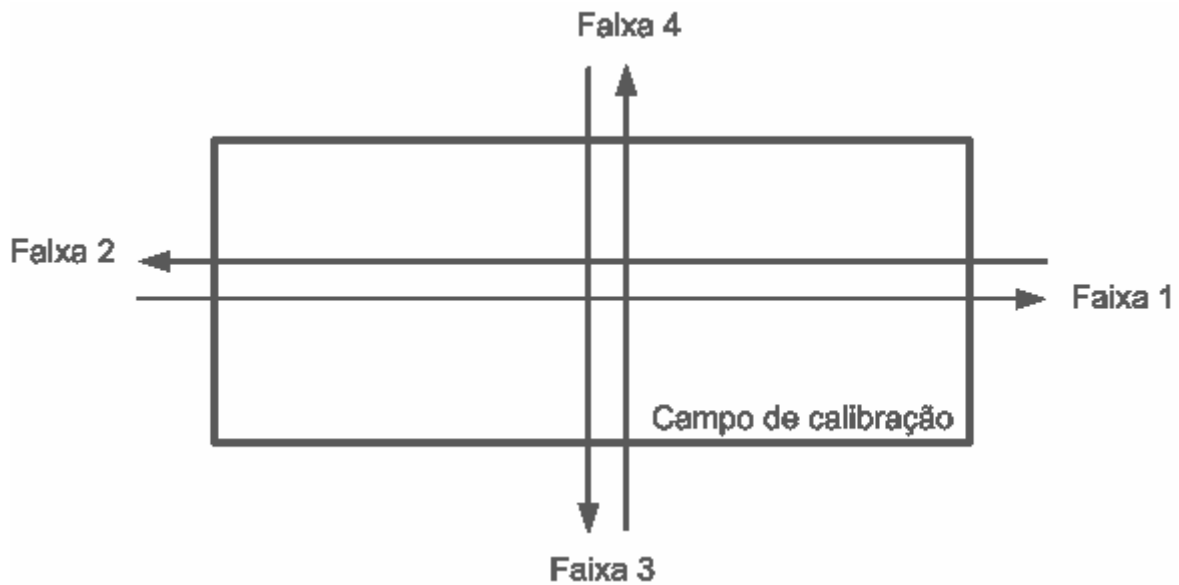


FIGURA 4 - DIREÇÃO E SENTIDO DAS LINHAS DE VOO PARA A CALIBRAÇÃO  
FONTE: O Autor.

As equações de colinearidade (4) e (5), acrescidas de sete parâmetros de orientação interior (15) e (16), coordenadas do ponto principal ( $x_0$ ,  $y_0$ ), coeficientes da distorção radial simétrica ( $k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$ ), e coeficientes da distorção descentrada ( $P_1$  e  $P_2$ ), são comumente empregadas num processo de calibração.

$$x = -f \frac{m_{11}(X - X_0) + m_{12}(Y - Y_0) + m_{13}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} + x_0 + \delta x_r + \delta y_d \quad (15)$$

$$y = -f \frac{m_{21}(X - X_0) + m_{22}(Y - Y_0) + m_{23}(Z - Z_0)}{m_{31}(X - X_0) + m_{32}(Y - Y_0) + m_{33}(Z - Z_0)} + y_0 + \delta y_r + \delta y_d \quad (16)$$



### 2.1.5 Aerotriangulação

Segundo Andrade (2003), o procedimento fotogramétrico conhecido na sua forma geral como fototriangulação, pode ser denominado de aerotriangulação, triangulação aérea ou triangulação espacial quando fotografias aéreas são empregadas. Nesse trabalho será adotada a terminologia aerotriangulação. Maiores detalhes sobre essa terminologia podem ser obtidos em Lugnani (1987) e Moffitt (1980).

A aerotriangulação pode ser entendida como sendo a recessão e a interseção espacial de um conjunto de imagens realizadas simultaneamente. O procedimento determina indiretamente os parâmetros de orientação exterior de um conjunto de imagens, através de um ajustamento simultâneo que tem como base as equações de colinearidade, observações de pontos fotogramétricos e de apoio, geometricamente distribuídos nas imagens, como também das precisões resultantes nos procedimentos utilizados nas obtenções das coordenadas de pontos nos referenciais envolvidos.

Apesar de existir formulação matemática para determinar o número e a distribuição dos pontos de apoio num bloco fotogramétrico, como mostrado em Ministério do Exército (1984) e Moffitt (1980), a prática consagrou a distribuição de pontos de apoio tridimensionais no perímetro do bloco com espaçamento entre 3 a 5 bases, na região de superposição lateral, conforme mostrado na Figura 5.

Os pontos de apoio vertical devem ser distribuídos ao longo de linhas formadas pelos pontos tridimensionais, perpendicularmente à linha de voo e situados preferencialmente na região de superposição entre faixas, como apresentado na Figura 5.

Devido às facilidades operacionais para o levantamento tridimensional de coordenadas geodésicas, com as técnicas de posicionamento por satélite *Global Navigation Satellite System* (GNSS), geralmente ocorre que todos os pontos de controle num bloco fotogramétrico são tridimensionais.

Os pontos de apoio podem ser detalhes pontuais naturais ou pré-sinalizados nas imagens. Os pontos de apoio pré-sinalizados possuem vantagem de apresentar maior facilidade de leitura nas imagens, permitindo uma maior precisão na obtenção de suas coordenadas se comparadas com as obtidas de um detalhe natural. Tanto

os pontos de apoio naturais quanto os pré-sinalizados devem possuir bom contraste e tamanho adequado à escala da imagem.

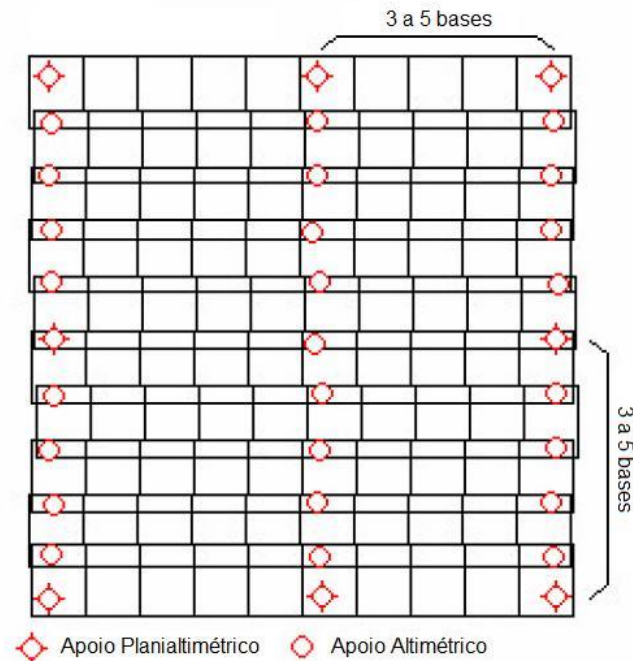


FIGURA 5 - BLOCO FOTOGRAMÉTRICO COM A DISTRIBUIÇÃO DOS PONTOS DE APOIO

FONTE: O Autor

Segundo o Ministério do Exército (1984) e Wolf (2004), geralmente os modelos de alvos pré-sinalizados utilizados na Fotogrametria são os apresentados na Figura 6.



FIGURA 6 - MODELOS MAIS COMUNS DE ALVOS PRÉ-SINALIZADOS

FONTE: ADAPTADO DE WOLF (2004) E MINISTÉRIO DO EXÉRCITO (1984).

O procedimento de aerotriangulação analítica, mais empregado nos dias atuais, é denominado de ajustamento por feixes de raios ou na língua inglesa de *Bundle Adjustment*. As equações de colinearidade (4) e (5) são utilizadas como modelo funcional. Na forma mais usual para a realização do processo, um pré-

processamento será necessário a fim de minimizar os afastamentos da condição de colinearidade nas observações fotogramétricas, provocados pelo afastamento do ponto principal e das distorções de lentes. Para tanto, um procedimento de calibração de câmaras sempre será necessário para a determinação dos parâmetros dos orientação interior.

### 2.1.6 Precisão Altimétrica Esperada

Segundo Albertz & Kreiling (1989), a precisão esperada para a determinação altimétrica em processos de aerotriangulação, pode ser determinada pela equação (17). O valor da precisão ( $dz$ ) é determinado em função da altura de voo ( $H$ ), base fotogramétrica ( $B$ ) e da precisão de medida da paralaxe ( $d_{px}$ ).

$$dz = \pm \frac{H^2}{B \cdot f} d_{px} \quad (17)$$

### 2.1.7 Estado da Arte da Temática de Pesquisa

Câmaras digitais de baixo custo estão sendo cada vez mais utilizadas nas aplicações fotogramétricas (HABIB & MORGAN, 2003). A utilização de câmaras de baixo custo já não está mais restrita às instituições de pesquisa. Dentre os muitos trabalhos e pesquisas realizadas com essas câmaras, quer no âmbito nacional ou internacional pode-se citar: reconstrução de edificações - Botelho (2007), Mitishita et al. (2008); extração automática de contornos de edificações - Rottensteiner & Briesse (2003); Machado (2006), Machado & Mitishita. (2006); delimitação de zona costeira - Ferreira Jr et al. (2005); delimitação das áreas de preservação permanente - Santos & Cardoso (2007); atualização cadastral - Côrtes (1998), Gonçalves (2006), Marcato Jr et al. (2009); identificação de vegetação - Disperati & Oliveira Filho (2005); geração de ortofotos - Habib et al. (2007), Mendonça Jr (2009) e a integração de fotografias tomadas com câmara de baixo custo e dados LIDAR - Delara et al (2004), Mitishita et al. (2004), Kersting, (2006), Fierro, (2007).

A calibração de câmara digital de pequeno formato, utilizando processo de autocalibração, é um tópico muito debatido por pesquisadores de Fotogrametria e

Visão Computacional. Fraser (1997) revisou a formulação matemática do processo de autocalibração e discutiu as principais fontes de desvios do raio de luz que dá origem à imagem, no modelo de colinearidade.

Mitishita et al. (2003) realizou a autocalibração pelo ajustamento simultâneo por feixes de raios de uma câmara de vídeo HITACHI, usando um conjunto de imagens aéreas convergentes obtidas em um campo de calibração. Assim, as imagens obtidas com essa câmara de vídeo foram corrigidas das distorções sistemáticas da imagem, podendo ser utilizadas em aplicações fotogramétricas.

Machado et al. (2003) realizaram a análise da estabilidade da câmara digital de baixo custo Sony DSC-F717. A câmara foi calibrada três vezes ao longo de dois meses. Após a análise dos três conjuntos dos Parâmetros de Orientação Interior (POI), concluiu-se que os parâmetros eram aproximadamente iguais, então a câmara foi considerada estável durante o período de tempo testado.

Habib & Morgan (2005) calibram a câmara digital Sony DSC-F707 duas vezes em dez meses com o objetivo de realizar a análise da estabilidade. Nesse período de tempo a câmara foi considerada estável, pois os parâmetros de orientação interior obtidos nas duas calibrações foram quase idênticos.

RUY et al. (2008) verificaram a influência da temperatura nos parâmetros de orientação interior numa fototriangulação com adição do modelo de lentes (*Lens Distortion*) nas equações de colinearidade. Três blocos tomados com altura de voo de 2200, 1110 e 1110 metros, juntamente com os valores das temperaturas 4,7°C, 8,7°C e 4,7°C foram testados. Essas temperaturas foram estimadas com base num modelo de atmosfera padrão, a partir de dados meteorológicos, considerando o dia e horário de sua realização. Nesse trabalho, os autores concluíram que existe correlação entre a temperatura e os parâmetros de distorção das lentes.

Cronk et al. (2006) apresentaram uma metodologia para calibrar câmara digital de baixo custo pela autocalibração com ajustamento simultâneo do feixe de raios. Além disso, desenvolveram um procedimento automático para medir as coordenadas dos alvos e estimar os valores iniciais dos parâmetros de orientação exterior das estações de exposição.

Tommaselli & Telles (2006) realizaram a autocalibração pelo ajustamento simultâneo dos feixes de raios usando linhas retas no espaço objeto como sendo equivalentes a pontos de apoio. Para tal, consideraram que qualquer desvio de uma

linha reta quando projetada do espaço objeto para o de imagem, pode ser modelado por parâmetros de distorções.

Habib et al. (2006) analisaram a estabilidade de uma câmara digital de baixo custo com base no grau de similaridade existente entre dois conjuntos de parâmetros de orientação interior, determinados em épocas distintas. Três metodologias foram empregadas para verificação do grau de estabilidade. O primeiro, denominado *Zero Rotation Method* (ZROT), é análogo ao processo de georreferenciamento direto. Neste processo fixa-se a posição e a atitude da câmara para a realização da interseção dos raios. O segundo método, denominado de *Rotation* (ROT), é semelhante ao processo de georreferenciamento indireto de imagens, no qual a posição é fixada e a atitude possui liberdade de movimentação para a melhor realização da interseção dos raios. E no último, denominado *Single Photo Resection Method* (SPR), os feixes de raios podem girar e deslocar, a fim de assegurar o melhor encaixe no espaço objeto, semelhante ao ajustamento simultâneo por feixes de raios. A metodologia foi verificada com base em seis calibrações realizadas com uma câmara Kodak DSC PRO 14n, num período de 7 meses. Nessa pesquisa, os autores concluíram que a estabilidade da câmera somente foi verificada com o método SPR. Por fim, concluíram que para a realização de georreferenciamento direto são necessários parâmetros de orientação interior com maior exatidão, pois pequenas alterações nesses acarretarão maior perda de qualidade geométrica na determinação espacial. Por outro lado no georreferenciamento indireto, a menor exatidão nos parâmetros de orientação interior pode ser compensada na determinação dos parâmetros de orientação exterior.

Wackrow et al. (2007) verificaram a estabilidade e consistência de fabricação em sete câmaras digitais Nikon Coolpix 5400 por mais de um ano. Neste período, as câmaras foram calibradas quatro vezes. A estabilidade temporal foi verificada comparando-se as coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação com as coordenadas determinadas pela intersecção fotogramétrica, usando os diferentes parâmetros de orientação interior obtidos nas calibrações. Para avaliar a consistência de fabricação, a mesma metodologia foi usada, porém para corrigir os erros sistemáticos das imagens, usaram os parâmetros de orientação interior, obtidos de calibrações não coincidentes. Em imagens tomadas a 1,5 metros de distância, de um campo de teste, obteve-se precisão milimétrica, ao se comparar as

coordenadas dos pontos de verificação com as obtidas pela interseção espacial usando as imagens de uma câmara com os parâmetros de orientação interior de outra. Concluíram que tanto as câmaras como seu processo de produção em série se mantiveram estáveis nos experimentos realizados.

Rieke-Zapp et al. (2009) relataram que nos últimos modelos de câmara digital de baixo custo foram incorporadas algumas características que podem causar a instabilidade na posição do sensor, o que não é permitido em Fotogrametria. Estas características são: sensor com vibração para a remoção de partículas de poeira e redução do arrastamento da imagem provocado pelo balanço da câmara durante a aquisição da imagem. Os autores analisando o desempenho de onze câmaras digitais na extração de informações métricas do espaço objeto, concluíram que resultados da extração que apresentaram melhores exatidões foram aqueles que empregaram os parâmetros de orientação interior proveniente de calibrações que consideraram a variabilidade do ponto principal por imagem.

Mitishita et al. (2009) verificaram a estabilidade da câmara digital Sony DSC F828, quando foi exposta a uma variação extrema de temperatura ambiente. Em duas calibrações a temperatura estava próxima de zero grau Celsius, e em quatro calibrações a temperatura estava próxima a 25 graus Celsius. Concluíram que os valores dos parâmetros de orientação interior obtidos nas seis calibrações realizadas não foram semelhantes. Por isso, a câmara digital Sony foi considerada geometricamente instável na realização de experimentos que simulou a realização de um georreferenciamento direto. Por outro lado, os experimentos realizados não foram capazes de provar se a instabilidade da câmara foi somente ocasionada pela variação de temperatura ambiente entre as diferentes calibrações realizadas.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e os métodos utilizados para a determinação dos parâmetros de orientação interior com diferentes métodos de calibração e das análises da estabilidade geométrica de duas câmaras de baixo custo serão descritos a seguir.

#### 3.1 Materiais

A seguir serão descritos os principais equipamentos e programas que foram utilizados neste trabalho de pesquisa.

##### 3.1.1 Programas ou *Softwares*

Os seguintes programas ou *softwares* foram utilizados neste trabalho: MATLAB 5.3; FORTRAN 7.7; Photo Desk 4.3; Camera Manager V 4.2 e Microsoft Office 2003.

Com o programa MATLAB 5.3 foi desenvolvido um programa de leitura monoscópica que permite a obtenção das coordenadas de linha e coluna de um ponto selecionado pelo operador em uma fotografia digital. As informações inerentes ao número da fotografia, número do ponto, e as coordenadas de linha e coluna do ponto são armazenadas no formato ASCII.

Com base na linguagem de programação FORTRAN 7.7, foi empregado o programa "CALIBRAV" para realizar os procedimentos de calibração da câmara e os experimentos de análise de estabilidade via aerotriangulação por feixes de raio (*Bundle Adjustment*).

O aplicativo Photo Desk foi utilizado para converter as fotografias tomadas com a câmara Kodak DCS Pro 14n de seu formato proprietário (dcr - *Digital Camera Raw*) para outro formato comercial, no caso desse trabalho o formato (tiff - *Tag Image File Format*).

O aplicativo Camera Manager foi utilizado para configurar e comandar remotamente a câmara Kodak DCS Pro 14n, gerenciando o intervalo entre disparos para as tomadas das fotografias e o armazenamento dessas imagens em disco rígido.

O pacote Office 2003 foi utilizado para a editoração do texto e realização de cálculos estatísticos, comparação de coordenadas e confecção de gráficos.

### 3.1.2 Equipamentos

Os principais equipamentos utilizados neste trabalho foram: computador; estação total, receptores de sinais GPS e duas câmaras digitais de baixo custo: a câmara Kodak DCS Pro14n e a câmara Sony DSC F828.

#### 3.1.2.1 Computador

O Curso de Pós Graduação em Ciências Geodésicas disponibilizou, no Laboratório de Fotogrametria, um computador com processador Core 2 Duo T 5600 de 2,8 GHz, 8,0 GB de memória RAM e disco rígido de 500 GB, com sistema operacional Windows XP 64x®, para uso exclusivo na execução deste trabalho.

#### 3.1.2.2 Câmaras Digitais

Neste trabalho foram utilizadas duas câmaras digitais de baixo custo: a câmara Kodak DCS Pro 14n de propriedade do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC); e a câmara Sony DSC F828 de propriedade do Laboratório de Fotogrametria do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná.

##### 3.1.2.2.1 Câmara Kodak DCS Pro 14n

A câmara Kodak DCS Pro 14n possui CMOS com 4500 linhas e 3000 colunas, tamanho do *pixel* de 0,0079 mm e está equipada com lentes NIKON AF



Nikkor de 35 mm. Esta câmara permite intercambiar o sistema de lentes. As dimensões e vistas frontal, lateral direita, lateral esquerda e posterior, podem ser visualizadas na Figura 7.



FIGURA 7 - CÂMARA KODAK DCS PRO 14N COM SUAS DIMENSÕES

FONTE: Disponível em <<http://www.dpreview.com/reviews/kodakdcs14n/>>. Acesso em: 06/02/2008.

As demais características técnicas da câmara Kodak DCS Pro 14n podem ser encontradas no sitio <http://www.dpreview.com/reviews/kodakdcs14n/>. Acesso em 24/02/2007.

#### 3.1.2.2.2 Câmara Sony DSC F828

A câmara Sony DSC F828 possui CCD de 3264 colunas por 2448 linhas, com tamanho do *pixel* de 0,0027 mm e distância focal de sete mm. Esta câmara possui o sistema de lentes fixado ao seu corpo, não permitindo, portanto, o intercambiamento de lentes. As dimensões e vistas frontal, lateral direita, lateral esquerda e posterior são apresentadas na Figura 8.



FIGURA 8 - CÂMARA SONY DSC F828 COM SUAS DIMENSÕES

FONTE: Disponível em <http://www.dpreview.com/reviews/sonydscf828/page2.asp>  
Acesso em 11/07/2007.

As demais características técnicas da câmara Sony DSC F828 podem ser encontradas no site <http://www.dpreview.com/reviews/sonydscf828/page2.asp>. Acesso em 11/07/2007.

### 3.1.2.3 Estação Total

A estação total da marca Leica modelo TC 403 foi utilizada para a realização dos seguintes levantamentos topográficos:

- obtenção das coordenadas dos alvos pré-sinalizados do campo de calibração terrestre tridimensional Gabião;
- obtenção das coordenadas dos pontos de verificação situados nos cumes e bordas dos telhados das edificações selecionadas no campo de calibração aéreo tridimensional Bacacheri.

Os métodos de levantamentos utilizados foram os de caminhamento com irradiações e por irradiação de uma única estação conforme a visibilidade dos alvos.

As especificações da estação total da marca Leica modelo TC 403 podem ser encontradas no Catálogo da Estação Total TPS 400, disponível em <http://www.manfra.com.br/produtos.php?produto=18&tipo=novos>. Acesso em 20/06/2009.

### 3.1.2.4 Receptor de Sinais GPS

Para a obtenção das coordenadas dos alvos pré-sinalizados foi utilizado um par de receptores de sinais GPS da marca Leica modelo 1200. Esse receptor é de dupla frequência (L1 e L2) e foi equipado com um rádio de comunicação de dados de 15 w, com alcance de 15 km e antena GX1230. O método de posicionamento *Real Time Kinematic* (RTK) fornece precisão planimétrica de  $\pm 10$  mm + 1 ppm e precisão altimétrica de  $\pm 20$  mm + 1 ppm. No método de posicionamento estático fornece precisão planimétrica de  $\pm 5$  mm + 0,5 ppm e precisão altimétrica de  $\pm 10$  mm + 0,5 ppm. As demais especificações técnicas desse receptor podem ser obtidas no [sitio](http://www.geoservis.si/download/doc/System1200/GPS1200_User_en.pdf) [http://www.geoservis.si/download/doc/System1200/GPS1200\\_User\\_en.pdf](http://www.geoservis.si/download/doc/System1200/GPS1200_User_en.pdf) com acesso em 10/10/2009.

### 3.1.2.5 Campos de Calibração

As técnicas de calibração das câmaras empregadas na determinação dos parâmetros de orientação interior utilizaram três campos de calibração distintos, sendo um plano e dois tridimensionais. O campo de calibração plano foi previamente implantado por pesquisadores do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas (CPGCG), numa das paredes do edifício do bloco VI do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná (UFPR). O campo de calibração terrestre tridimensional - Gabião foi implantado pelo autor, em um gabião existente no Centro Politécnico da UFPR. O campo de calibração aéreo tridimensional Bacacheri, também foi implantado pelo autor nas ruas próximas ao aeroporto do Bacacheri, na cidade de Curitiba.

#### 3.1.2.5.1 Campo de Calibração Terrestre Plano Parede

O campo de calibração terrestre plano Parede (CCTPP) foi implantado em uma parede plana que possui 9,80m de largura e 7,80m de altura, conforme mostrado na Figura 9.

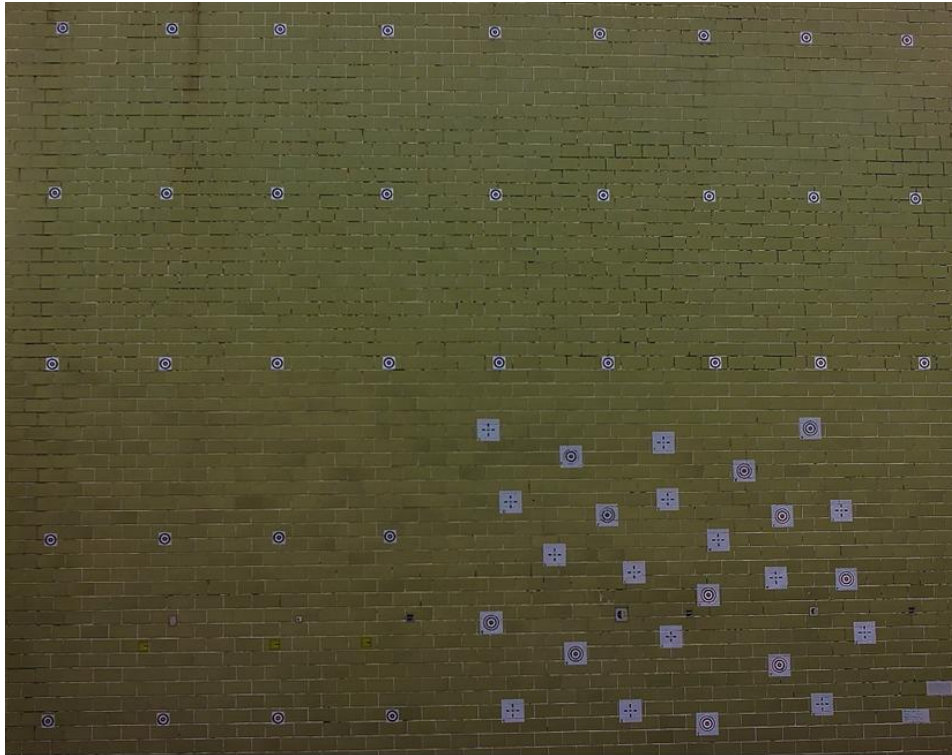
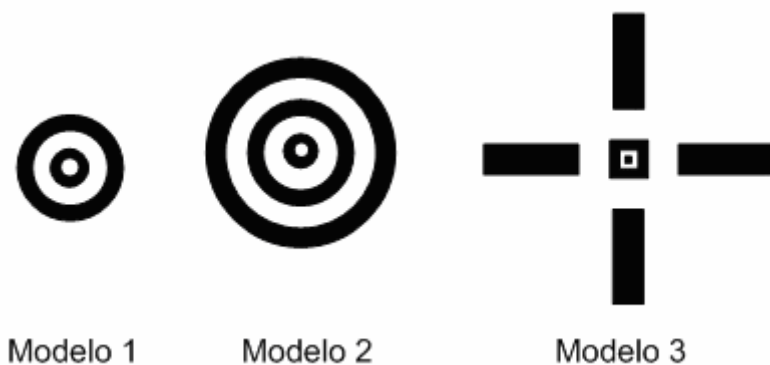


FIGURA 9 - FOTOGRAFIA DO CAMPO DE CALIBRAÇÃO TERRESTRE PLANO PAREDE  
FONTE: O Autor.

Esse campo possui 60 alvos pré-sinalizados, sendo 25 com distribuição aleatória e 35 com distribuição regular. Três modelos de alvos pré-sinalizados são empregados, sendo 35 alvos do modelo um, 10 alvos do modelo dois e 15 alvos do modelo três, conforme mostra a Figura 10.



Modelo 1

Modelo 2

Modelo 3

FIGURA 10 - TIPOS DE ALVOS PRÉ-SINALIZADOS UTILIZADOS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO TERRESTRE PLANO PAREDE.  
FONTE: O Autor.

A numeração dos alvos pré-sinalizados no campo de calibração plano está apresentada na Figura 11.

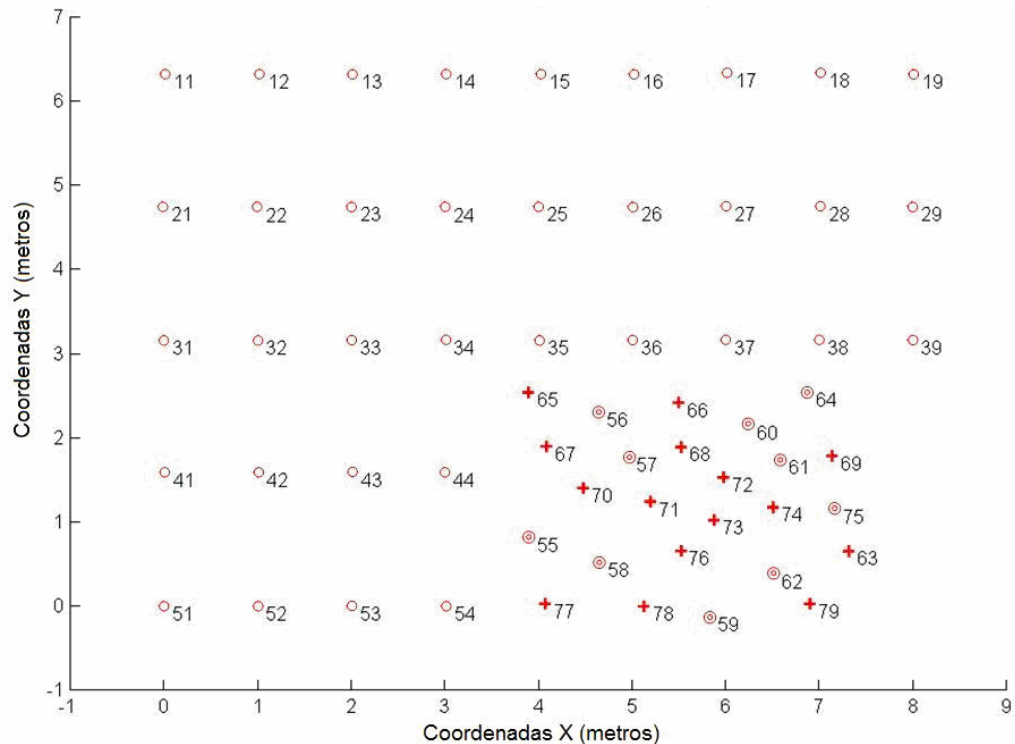


FIGURA 11 - NUMERAÇÃO DOS ALVOS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO TERRESTRE PLANO PAREDE  
FONTE: O Autor.

As coordenadas dos alvos pré-sinalizados do campo de calibração terrestre plano parede são apresentadas no Apêndice 1.

### 3.1.2.5.2 Campo de Calibração Terrestre Tridimensional Gabião

Esse campo foi implantado em um gabião localizado entre o bloco VII e o campo de futebol do Centro de Recreação do Centro Politécnico da UFPR. O campo de calibração terrestre tridimensional Gabião (CCTTG) possui três planos espaçados de metro em metro. Esse campo possui as seguintes dimensões: três metros de altura, seis metros de comprimento e três metros de largura na parte superior. A Figura 12 mostra um esquema do campo de calibração terrestre tridimensional Gabião com suas dimensões.



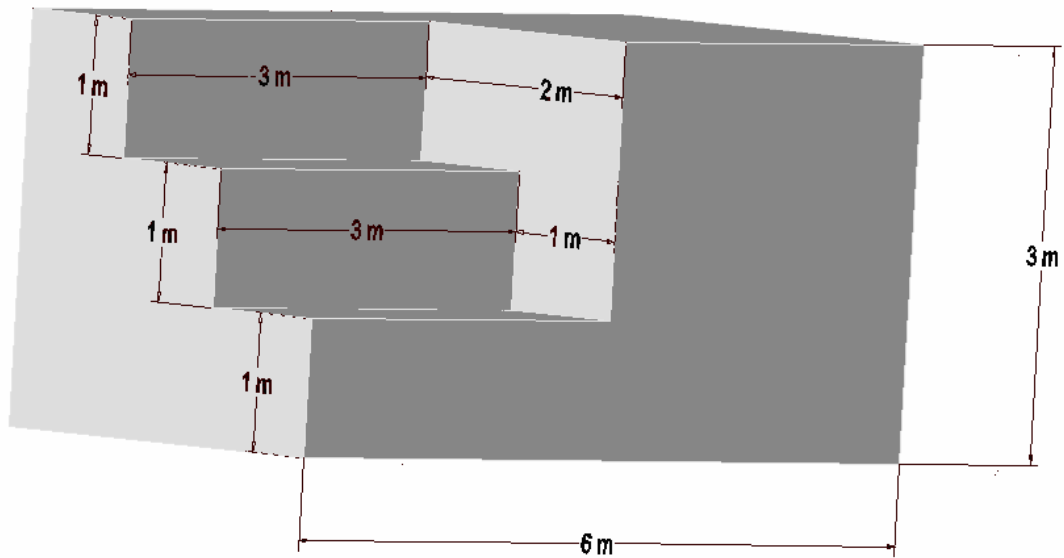


FIGURA 12 - DIMENSÕES DO CAMPO DE CALIBRAÇÃO TERRESTRE TRIDIMENSIONAL GABIÃO.  
FONTE: O Autor.

Esse campo possui 39 alvos pré-sinalizados distribuídos aleatoriamente, conforme mostrado na Figura 13. Com a finalidade de aumentar o contraste entre o alvo e a tonalidade do gabião, uma região no entorno de cada alvo foi pintada na cor branca.



FIGURA 13 - CAMPO DE CALIBRAÇÃO TERRESTRE TRIDIMENSIONAL GABIÃO  
FONTE: O Autor.

O modelo de alvo pré-sinalizado escolhido foi um quadrado com um círculo no centro (Figura 14). O quadrado possui lado de cinco centímetros e espessura do traço de oito milímetros; o círculo central possui diâmetro de quatro milímetros. As dimensões do alvo no terreno foram determinadas com base nas dimensões dos *pixels* das câmaras utilizadas e na dimensão do alvo na imagem.



FIGURA 14 - MODELO DE ALVO UTILIZADO NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO GABIÃO

FONTE: O Autor.

As coordenadas dos alvos pré-sinalizados foram obtidas por levantamento topográfico convencional. As medidas angulares e lineares foram realizadas com uma estação total, marca Leica, modelo TC 403, sendo as medidas lineares realizadas eletronicamente sem prisma.

O levantamento topográfico foi realizado por irradiação a partir de uma única estação. Cada alvo pré-sinalizado foi medido seis vezes em pontaria completa, ou seja, na posição direta (PD) e na posição inversa (PI) da luneta. Esse procedimento foi repetido três vezes, portanto, cada alvo pré-sinalizado foi mensurado 36 vezes.

Com o objetivo de eliminar os erros de pontaria, foi realizado a *priori*, um pré-processamento desses dados. Nesse pré-processamento, foram eliminadas as medidas que apresentavam discrepâncias com médias superiores à precisão da estação total, ou seja,  $\pm 3$  mm para as medidas lineares e  $\pm 3$  segundos para as medidas angulares. Após a eliminação dos dados discrepantes, foram calculadas as coordenadas dos alvos pré-sinalizados usando a média dos ângulos e das distâncias. A precisão obtida para as coordenadas tridimensionais foi de 3 milímetros.

#### 3.1.2.5.3 Campo de Calibração Tridimensional Bacacheri

O campo de calibração tridimensional denominado Bacacheri (CCTB) foi implantado entre o aeroporto do Bacacheri e a Praça Brigadeiro do Ar Mário Calmon Eppinghaus. Esse campo está inserido em parte dos bairros Bacacheri, Cabral e

Jardim Social, na cidade de Curitiba, possui aproximadamente 2,5 km<sup>2</sup> e contém 109 alvos pré-sinalizados distribuídos aleatoriamente.

A Figura 15 mostra o mosaico das fotografias aéreas com a distribuição dos pontos pré-sinalizados do campo de calibração tridimensional Bacacheri.



● Alvos pré-sinalizados

FIGURA 15 - DISTRIBUIÇÃO DOS ALVOS PRÉ-SINALIZADOS NO CAMPO DE CALIBRAÇÃO AÉREO TRIDIMENSIONAL BACACHERI  
FONTE: O Autor.

O diâmetro calculado dos alvos pré-sinalizados foi 0,60 m, seguindo as recomendações do Ministério do Exército (1984), tendo como referência a altura de voo (1000 metros), dimensão do *pixel* da câmara Kodak DCS Pro 14n e dimensão do alvo na imagem.

Todos os alvos foram materializados diretamente sobre o asfalto com tinta branca Acetato de Poli-Vinila (PVA), obtendo assim alto contraste com a cor do asfalto (Figura 16b).

Com o intuito de garantir a segurança na implantação dos marcos, tanto na implantação dos alvos quanto na obtenção de suas coordenadas, os mesmos foram materializados próximos ao meio fio e no eixo das ruas consideradas sem saída ou com pouco tráfego de veículos, com o auxílio de um molde de papelão (Figura 16a).



Evitou-se implantar alvos pré-sinalizados próximo aos objetos que pudessem obstruí-los no momento da tomada da fotografia aérea tais como árvores e edifícios.

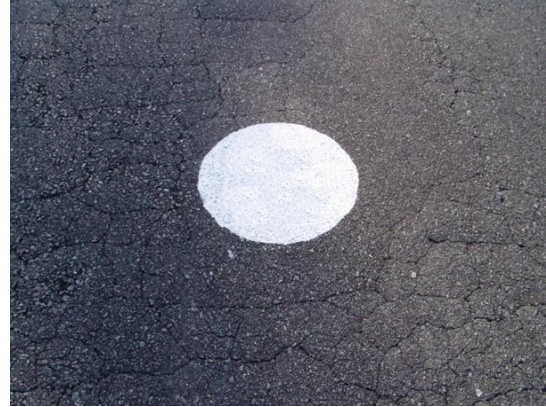


FIGURA 16A - IMPLANTAÇÃO DE ALVOS PRÉ-SINALIZADOS

FIGURA 16B - ALVO PRÉ-SINALIZADO

FONTE: O Autor

As coordenadas dos alvos pré-sinalizados do campo de calibração Bacacheri foram obtidas utilizando um par de receptores de sinais GPS, no sistema de referência geodésico SIRGAS 2000 e sistema de projeção cartográfica UTM, no fuso 22 (MC 51° W).

Com um receptor de sinais GPS, marca Leica, série 1200, as coordenadas foram calculadas em relação à base pelo método estático. As coordenadas desse ponto foram ajustadas a partir de dois vetores formados com as estações de Ourinhos e Guarapuava pertencentes à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC). A base foi ocupada por 8 horas e 17 minutos, com taxa de gravação de 5 segundos. O ponto base foi implantado no centro do campo de calibração tridimensional Bacacheri e coincidentemente esse foi o local que possuía a maior altitude ortométrica.

Dos 109 alvos pré-sinalizados, 21 tiveram as suas coordenadas obtidas pelo método de posicionamento estático rápido com tempo de ocupação de 12 minutos e taxa de gravação de cinco segundos. Usando o método de levantamento *Real Time Kinematic* (RTK), obtiveram-se as coordenadas dos 109 (cento e nove) alvos pré-sinalizados inclusive dos 21 alvos pré-sinalizados obtidas pelo método estático rápido. Os pontos foram ocupados no método RTK até que o RMS de suas coordenadas fosse inferior a três centímetros.

As coordenadas dos alvos pré-sinalizados do campo de calibração tridimensional Bacacheri foram obtidas pelo método estático rápido ou pelo método RTK e são apresentadas no Apêndice 2.

### 3.1.3 Tomadas das Fotografias nos Processos de Calibração

Os parâmetros de orientação interior foram obtidos por processo de calibração da câmara. Nas tomadas das fotografias aéreas ou nas terrestres, as câmaras mantiveram as mesmas configurações. As câmaras fotográficas utilizadas nessa pesquisa possuem mecanismo de focalização manual e automática do objeto fotografado. Como a geometria projetiva de uma câmara é modificada quando se altera a distância focal, a focalização foi configurada no modo manual e a objetiva colocada na posição de foco no infinito em todos os experimentos realizados nesta pesquisa.

#### 3.1.3.1 Configuração da Câmara Kodak DCS Pro 14n

Todas as fotografias tomadas com a câmara Kodak DCS Pro 14n tiveram a seguinte configuração:

- distância focal configurada no modo manual e focada para o infinito;
- o anel de focagem foi provisoriamente fixado com fita aderente;
- abertura do diafragma foi posicionada no modo automático;
- tempo de exposição foi ajustado para 1/1000 s;
- formato de saída das fotografias escolhido foi DCR, formato proprietário da Kodak;
- máxima resolução espacial (4500 x 3000 *pixel*);
- resolução radiométrica de 12 bits.

Utilizou-se o programa Photo Desk V 4.3.0 da Kodak, para compor a imagem colorida e convertê-la para o formato TIFF.

### 3.1.3.2 Configuração da Câmara Sony DSC F828

Todas as fotografias tomadas com a câmara Sony DSC F828 tiveram a seguinte configuração:

- distância focal configurada no modo manual e focada para o infinito;
- o anel de focagem foi provisoriamente fixado com fita aderente;
- abertura do diafragma foi posicionada no modo automático;
- tempo de exposição foi ajustado para 1/1000 s;
- formato de saída das fotografias JPG sem compressão;
- máxima resolução espacial (3264 x 2448 *pixel*);
- resolução radiométrica de 8 bits.

## 3.2 Metodologia

As câmaras de baixo custo KODAK DCS Pro 14n e SONY DSC F828 tiveram a suas geometrias projetivas determinadas por diferentes calibrações realizadas com fotografias aéreas e terrestres e analisadas as suas estabilidades. Ambas as câmaras foram calibradas pelo método das câmaras convergentes com fotografias tomadas dos campos de calibração plano parede e tridimensional gabião. Nas calibrações usando fotografias aéreas, foram propostas duas metodologias, sendo uma baseada no método dos campos mistos, denominada neste trabalho como "método de calibração com diferentes alturas de voo" e a outra baseada no método das câmaras convergentes, denominado de "método de calibração com fotografias aéreas inclinadas".

Para análise da estabilidade da geometria projetiva de cada uma das câmaras empregadas nessa pesquisa, além da análise estatística dos parâmetros de orientação interior determinados em cada calibração, foram realizados processamentos de aerotriangulação por feixes de raios (*bundle adjustment*) com diferentes correções dos erros sistemáticos da imagem, empregando os parâmetros de orientação interior obtidos em cada uma das calibrações realizadas. Portanto, cada calibração originou uma aerotriangulação. As coordenadas dos pontos de

verificação pré-sinalizados obtidas por levantamento geodésico foram comparadas com as coordenadas resultantes das aerotriangulações e as exatidões permitiram as conclusões sobre a estabilidade da geometria projetiva de cada uma das câmaras. Outrossim, foi também realizado um estudo sobre a influência de grande variação de temperatura na determinação da geometria projetiva de uma câmara, visto que, na maioria das vezes a temperatura de calibração da câmara usando campo de calibração terrestre é diferente da temperatura existente num recobrimento aéreo.

### 3.2.1 Recuperação da Geometria Projetiva

Para recuperar a geometria projetiva das câmaras Kodak e Sony, foram realizadas duas calibrações aéreas e dez calibrações terrestres, sendo oito calibrações em campo plano e duas calibrações em campo tridimensional.

A seguir serão descritos os procedimentos realizados em cada um dos campos de calibração utilizados nessa pesquisa.

#### 3.2.1.1 Calibração Terrestre

Nas calibrações terrestres de ambas as câmaras adotou-se o método das câmaras convergentes nos campos de calibração terrestre plano e tridimensional.

As fotografias empregadas foram tomadas em três estações de exposições distintas, aproximadamente 6 metros do campo, conforme mostrado na Figura 17.

Em cada estação de exposição foram tomadas quatro fotografias. Em cada tomada, a câmara foi rotacionada de  $90^\circ$ , no eixo Z. Assim as fotografias foram tomadas com ângulos de rotação Kappa de  $0^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $270^\circ$  conforme esquema apresentado na Figura 17.

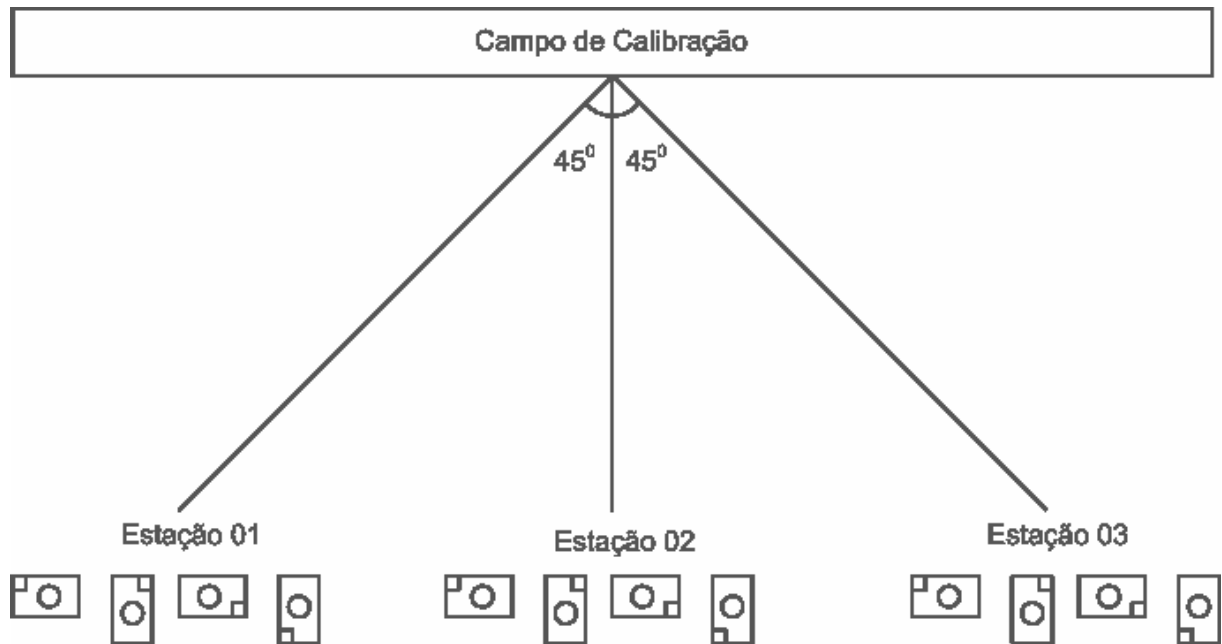


FIGURA 17 - ESTAÇÕES DE TOMADA DAS FOTOGRAFIAS E ROTAÇÕES DA CÂMARA EM CADA ESTAÇÃO.  
 FONTE: O Autor.

Oito calibrações foram realizadas no campo de calibração terrestre plano, sendo três calibrações para a câmara Kodak e cinco calibrações para a câmara Sony. No campo tridimensional, cada câmara, teve uma calibração. A Tabela 1 especifica a câmara, a data das tomadas das fotografias e o tipo de campo utilizado nas calibrações terrestres.

Tabela 1 - Modelo da Câmara, data da tomada das fotografias e campo usado para a calibração

Câmara	Campo Plano Parede - CCTPP	Campo Tridimensional Gabião - CCTTG
Kodak DCS Pro 14n	16/11/2006	24/06/2009
	09/02/2007	
	14/01/2009	
Sony DSC F828	16/12/2008	30/01/2009
	23/01/2009 <sup>2</sup>	
	26/01/2009	
	18/06/2009	
	26/09/2009	

FONTE: O Autor.

<sup>2</sup> Calibração realizada com câmara submetida à temperatura controlada de 3° C.

### 3.2.1.2 Calibração Usando Fotografias Aéreas

A calibração usando fotografias aéreas foi proposta para verificar se os parâmetros de orientação interior determinados nesse caso permitem melhor definição da geometria projetiva quando comparados com os obtidos pela calibração terrestre. Ressalta-se que as condições ambientais as quais a câmara está submetida na tomada das fotografias aéreas são diferentes das condições ambientais no momento da calibração terrestre.

A seguir será descrita a metodologia utilizada nos dois métodos de calibração usando fotografias aéreas.

#### 3.2.1.2.1 Calibração Usando Fotografias Aéreas com Altura de Voo Diferente

Conforme Merchant (1979) no método de calibração dos campos mistos, as correlações existentes entre a distância focal e as coordenadas do ponto principal com os parâmetros de posição da imagem ( $X_o$ ,  $Y_o$ ,  $Z_o$ ) numa fotografia vertical, são quebradas pelas grandes diferenças de níveis existentes nos alvos implantados num campo fortemente acidentado. As diferenças de nível devem ser superiores a 20% da altura de voo.

No método aéreo de calibração sugerido, propõem-se a quebra das correlações existentes entre os parâmetros de orientação interior e exterior mencionados, com o uso de fotografias aéreas verticais tomadas com diferentes alturas de voo, de um campo tridimensional relativamente plano, cuja diferença de nível máxima entre os alvos pré-sinalizados foi de 35,36 metros. Para tanto, um conjunto de oito faixas ortogonais cruzadas no centro do campo de prova e com alturas de voo de 1000 e 2000 metros são sugeridas para a realização do método proposto, conforme esquema mostrado na Figura 18.

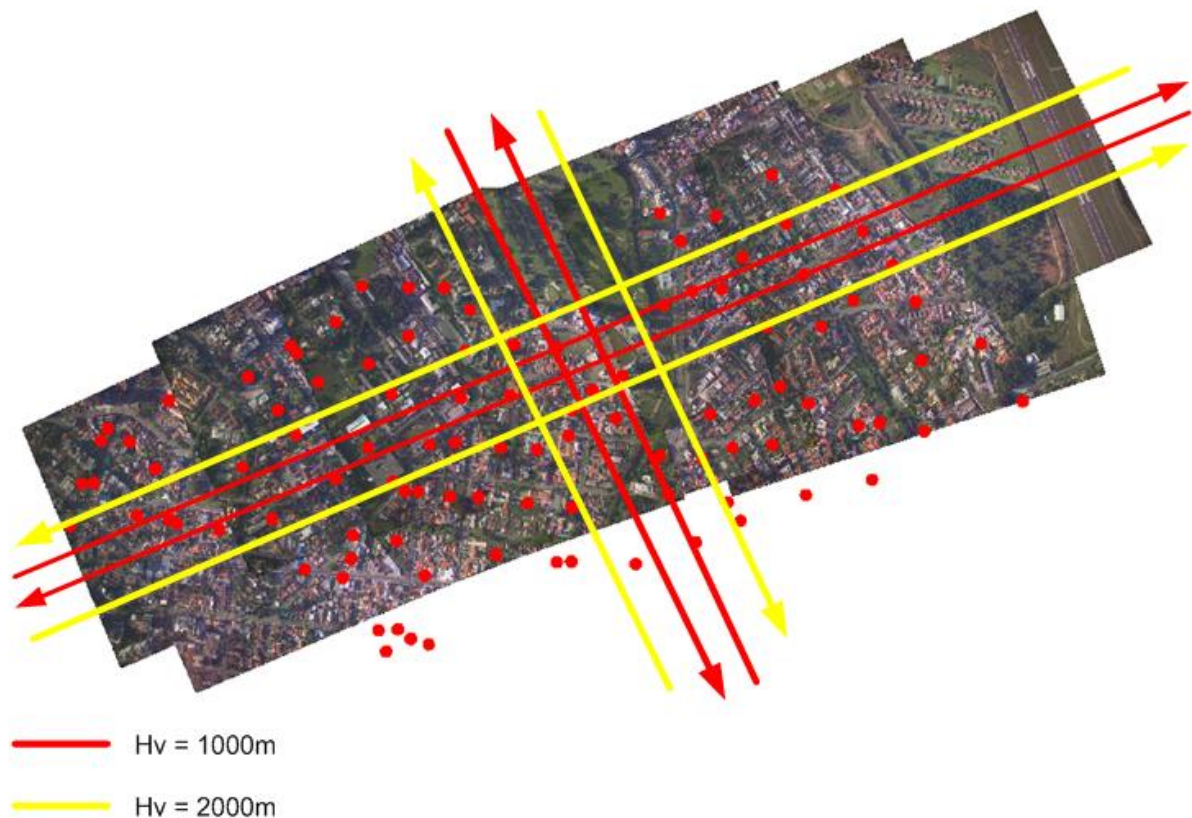


FIGURA 18 - SENTIDO E DIREÇÃO DE VOO PLANEJADO PARA A TOMADA DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS COM ALTURAS DE VOO DIFERENTES.  
FONTE: O Autor.

A calibração usando fotografias aéreas com altura de voo diferente foi realizada no campo de calibração tridimensional Bacacheri. Para realizar esta calibração foram planejadas oito faixas de voo, sendo quatro faixas a 1000 metros e quatro faixas a 2000 metros acima do solo, com direção de voo leste-oeste, oeste-leste, norte-sul e sul-norte, conforme mostra o esquema da Figura 18.

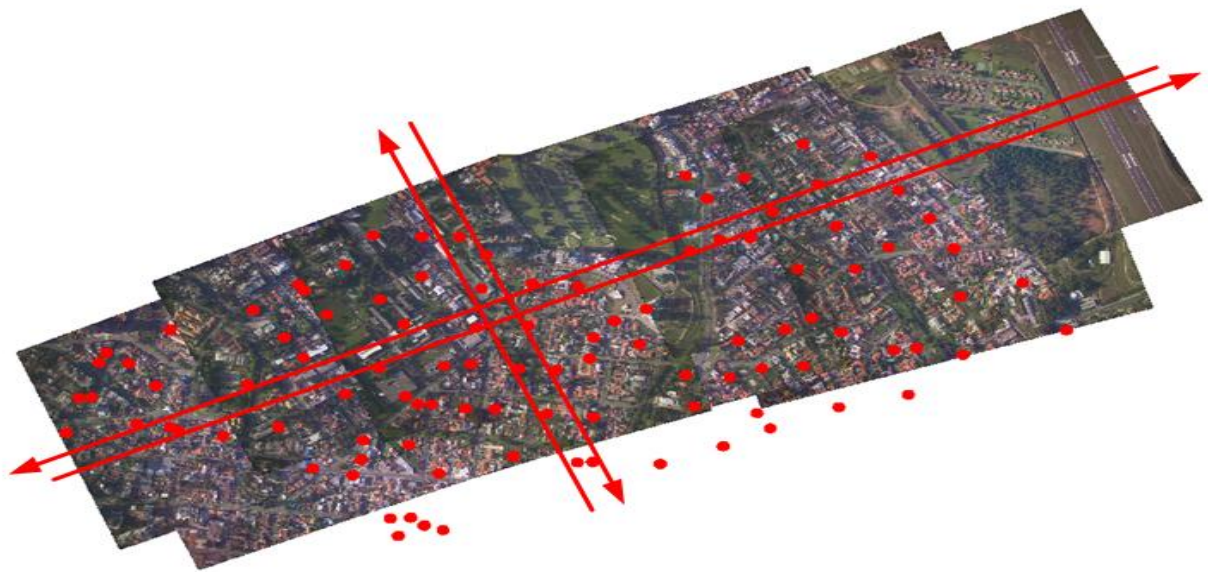
Somente a câmara Kodak teve a sua geometria projetiva recuperada usando esta metodologia. O programa DCS Camera Manager gerenciou o intervalo de disparo da câmara e o armazenamento das fotografias diretamente em um *notebook* no formato \*.DCR.

#### 3.2.1.2.2 Calibração Com Fotografias Aéreas Inclinadas

Esse método é uma variação do método das câmaras convergentes, na qual as fotografias aéreas são tomadas com ângulo  $\Phi$  ou  $\Omega$  variando de  $30^\circ$  a  $45^\circ$ .

Comparado com o método aéreo anterior, esse possui custo operacional inferior, pois utiliza uma única altura de voo. Quatro faixas ortogonais e cruzadas no centro do campo são tomadas com imagens inclinadas. Devido à inclinação das imagens, somente alvos perfeitamente visíveis nas imagens são medidos. Desta forma, recomenda-se um campo de calibração contendo um conjunto denso de alvos para viabilizar a metodologia proposta, como também o maior recobrimento longitudinal entre fotos para a seleção de imagens que contenham maior quantidade de alvos perfeitamente visíveis. A Figura 19 apresenta a representação dos eixos das faixas propostas para a tomada das fotografias aéreas para a realização da calibração usando fotografias aéreas inclinadas.

Com essa metodologia, foi recuperada apenas a geometria projetiva da câmara Sony.



● Alvos pré-sinalizados

FIGURA 19- SENTIDO E DIREÇÃO DE VOO PLANEJADO PARA A TOMADA DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS INCLINADAS.

FONTE: O Autor.

### 3.2.1.3 Calibração a Frio

No caso da calibração terrestre, a temperatura de calibração é diferente daquela existente no momento da tomadas das fotografias aéreas, devido à queda



da temperatura provocada pelo aumento da altitude de voo. Sabe-se que para cada 150 metros de elevação a temperatura do ar diminui em 1°C.

Com o propósito de verificar se a variação de temperatura traz influência na estabilidade da geometria projetiva, a câmara Sony foi calibrada em um ambiente com temperatura controlada de 3°C. Nessas condições, os parâmetros de orientação interior foram determinados e a sua estabilidade geométrica foi analisada. Essa calibração foi realizada no campo de calibração terrestre plano Parede, no dia 23/01/2009, pelo método das câmaras convergentes.

Ao submeter a câmara à baixa temperatura, a umidade do ar existente em seu interior pode condensar-se formando gotículas de água no sistema de lentes ou no sistema sensor. Essa condensação pode embaçar o sistema de lentes fazendo com que a imagem fique desfocada ou obstruir o raio de luz pelas gotículas de água formadas no sistema sensor ou no interior da objetiva. O procedimento utilizado para retirar a umidade da câmara e submetê-la à temperatura de 3°C encontra-se descrito no Apêndice 3.

No processo de tomada das fotografias, para as calibrações, devido ao cone da lente ser descentralizado em relação ao corpo da câmara, não foi possível obter as fotografias com o ângulo de rotação de 90°. Assim, as fotografias foram obtidas com os ângulos de rotação de 0°, de 135°, de 180° e de 270°.

### 3.2.2 Análise da Estabilidade

A análise da estabilidade das câmaras teve por objetivo verificar se as características internas da câmara, entre duas ou mais calibrações, foram modificadas de modo a alterar a precisão das informações provenientes da imagem.

Não existe uma metodologia consagrada para avaliar a variabilidade dos parâmetros de orientação interior obtidos em calibrações realizadas num dado intervalo de tempo, portanto, as estabilidades das câmaras avaliadas nessa pesquisa tomarão como base os seguintes procedimentos:

- aplicação de teste estatístico para verificar se os diversos conjuntos de parâmetros de orientação interior obtidos em diferentes calibrações são estatisticamente iguais;

- comparação do desempenho dos conjuntos dos parâmetros de orientação interior numa aplicação fotogramétrica que tem por objetivo a extração de informações métricas do espaço objeto.

Os parâmetros de orientação interior foram utilizados para corrigir os erros sistemáticos das medidas fotogramétricas de um bloco de fotografias aéreas, tomadas do campo de calibração tridimensional Bacacheri, gerando distintos conjuntos de dados que foram empregados no processamento de diferentes aerotriangulações. Foi admitido o valor de 0,5 *pixel* como sendo a variância das fotocoordenadas, e três centímetros para as variâncias das coordenadas geodésicas dos pontos de apoio. Em cada processamento das aerotriangulações realizadas, foram verificados se os valores das variâncias, *a posteriori*, das precisões dos resíduos das fotocoordenadas e dos resíduos nas coordenadas dos pontos de apoio são compatíveis com as precisões iniciais.

A estabilidade da geometria projetiva foi também analisada pelas discrepâncias existentes entre as coordenadas tridimensionais dos pontos de verificação pré-sinalizados, obtidas por aerotriangulação com as mesmas obtidas por levantamentos geodésicos realizado com receptor de sinais GPS.

As análises dos experimentos propostos permitiram a verificação das estabilidades geométricas das duas câmaras empregadas nesta pesquisa, no intervalo de tempo avaliado.

## 4 ANÁLISE DOS RESULTADOS E DISCUSSÕES

As análises de estabilidades das câmaras de baixo custo iniciaram-se com as análises das precisões obtidas nas diversas calibrações realizadas para as recuperações das geometrias projetivas das câmaras Kodak e Sony. As estabilidades das câmaras foram, inicialmente, determinadas com a aplicação de testes estatísticos que avaliam a igualdade dos diversos conjuntos de parâmetros de orientação interior determinados em diferentes calibrações. Aliado a essa análise estatística, também foram realizadas análises de precisões e exatidões de resultados obtidos em vários processamentos de aerotriangulações.

### 4.1 Resultados da Calibração da Câmara Kodak DCS Pro 14n

Considerando um período de três anos, a câmara Kodak DCS PRO 14n, teve a sua geometria projetiva recuperada cinco vezes. Sendo três recuperações realizadas no campo de calibração terrestre plano Parede, uma no campo de calibração terrestre tridimensional Gabião e a última no campo de calibração tridimensional Bacacheri usando fotografias aéreas.

As imagens utilizadas para a realização das calibrações, empregando os campos de calibração terrestre plano Parede e terrestre tridimensional Gabião foram obtidas de acordo com a metodologia indicada no item 3.2.1.1.

A tomada das imagens para a realização da calibração com fotografias aérea com altura de voo diferente foi realizada tomando-se como referência a metodologia proposta no item 3.2.1.2.1. Com base nisso, as seguintes considerações são apresentas.

O elevado tráfego aéreo na região do campo de calibração tridimensional Bacacheri, no instante do recobrimento aéreo, não permitiu as tomadas das faixas de recobrimento transversais fossem realizadas de acordo com o planejado e discutido na metodologia (item 3.2.1.2.1). Somente três faixas foram tomadas e ainda deslocadas para a lateral do campo de calibração, conforme mostrado na Figura 20. Devido a isso, o número de alvos foi drasticamente reduzido nas

fotografias dessas faixas, provocando enorme deficiência geométrica no processo proposto, e impondo a utilização de um conjunto de pontos fotogramétricos de ligação, definidos em detalhes pontuais.

As fotografias aéreas foram tomadas no dia 14 de maio de 2009, sendo quatro faixas com altura de voo de 1000 metros e três faixas com altura de voo de 2000 metros, perfazendo um total de sete faixas. O recobrimento longitudinal foi de 60%, no maior lado da fotografia, para todas as alturas de voo. Nas faixas paralelas ao campo de calibração, o recobrimento lateral foi de 95%, enquanto que, nas faixas transversais ao campo, o recobrimento lateral foi de 50%.

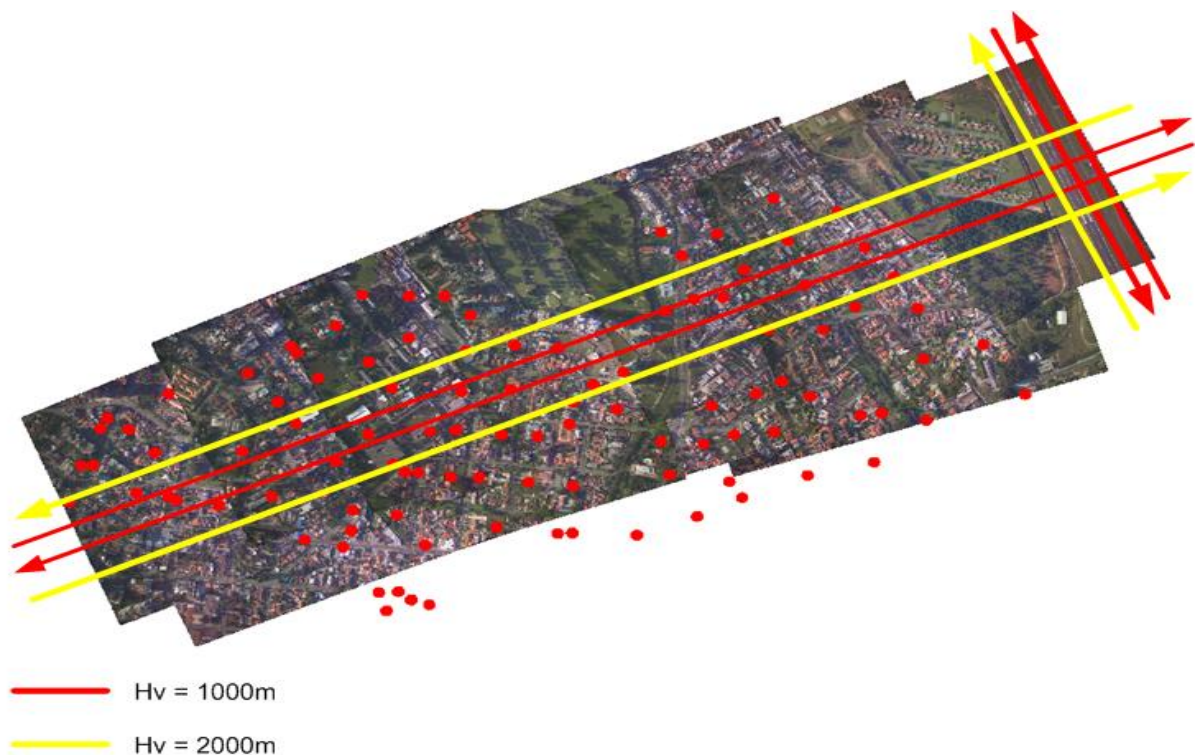


FIGURA 20 - SENTIDO E DIREÇÃO DE VOO REALIZADOS PARA A TOMADA DAS FOTOGRAFIAS AÉREAS COM ALTURAS DIFERENTES.

FONTE: O Autor.

No campo de calibração a maior diferença de nível entre os alvos pré-sinalizados possui o valor de 35,36 metros. Com relação à primeira altura de voo (1000m), essa diferença de nível representa 3,6%. Para a segunda, (2000m), representa 1,8%. Estes valores estão muito abaixo do valor mínimo recomendado (20%) para um campo tridimensional considerando a metodologia do campo misto.

Outra deficiência encontrada na operacionalização do método foi que os alvos pré-sinalizados foram dimensionados para a perfeita visualização nas imagens

tomadas com a altura de voo de 1000 metros. Nas fotografias tomadas a dois mil metros, a dimensão do alvo na imagem foi reduzida à metade, o que acarretou perda de alguns alvos nessas imagens, além de dificultar as medidas fotogramétricas e ocasionando menor precisão.

No processo de calibração foram utilizadas 29 fotografias, sendo nove fotografias tomadas com altura de voo de dois mil metros e 20 fotografias tomadas com altura de voo de um mil metros. Os dados inerentes às faixas de voo utilizadas são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Dados do voo realizado para a calibração da câmara Kodak com alturas de voo diferente

Faixa	Nº de Fotografias	Azimute de voo	Altura de voo	Resolução terreno (m)
01	4	200°	2000	0,44
02	3	25°	2000	
03	2	315°	2000	
04	2	127°	1000	0,22
05	3	298°	1000	
06	8	26°	1000	
07	7	159°	1000	

FONTE: O Autor.

Os pontos fotogramétricos pré-sinalizados e naturais, existentes nas imagens que foram empregadas nas calibrações terrestres e aéreas, foram medidos por procedimento monoscópico manual.

No ajustamento realizado para recuperar os parâmetros de orientação interior, foi atribuído à variância *a priori* o valor unitário, ao desvio padrão para as fotocoordenadas, o valor de 0,004 mm, equivalente a meio *pixel* na imagem. O desvio padrão utilizado nas coordenadas dos pontos de apoio variou de acordo com o método de levantamento e a precisão do equipamento utilizado na determinação dessas coordenadas. Assim, o desvio padrão adotado para as coordenadas dos pontos de apoio no campo de calibração terrestre plano Parede foi de um milímetro; no campo de calibração terrestre tridimensional Gabião, três milímetros e, no campo de calibração aéreo tridimensional Bacacheri, três centímetros.

Em todas as calibrações realizadas, os parâmetros da distorção descentrada  $P_1$  e  $P_2$  e o parâmetro da distorção radial simétrica  $K_3$  não foram significativos na matriz variância-covariância e, portanto, foram eliminados do ajustamento. Um novo ajustamento foi realizado considerando somente os parâmetros significativos. Na Tabela 3, são apresentados os parâmetros de orientação interior determinados nas

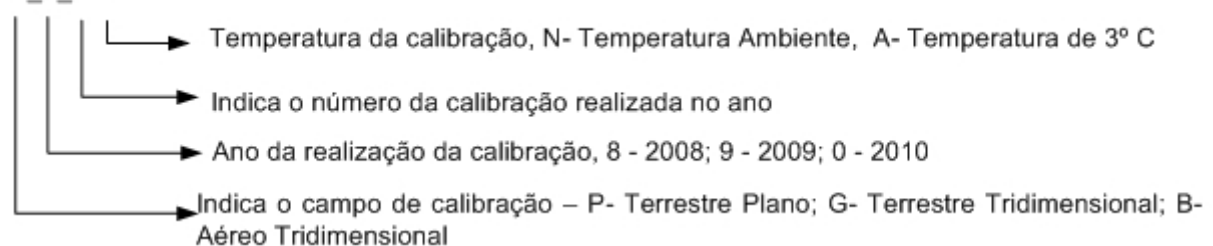
diversas calibrações realizadas com a câmara Kodak, como também, a data da tomada das fotografias, o tipo do campo de calibração utilizado e as variâncias *a posteriori* obtidas no ajustamento.

Tabela 3 - Parâmetros de orientação interior significativos nas diversas calibrações e variância *a posteriori* do ajustamento, como também o campo de calibração utilizado e a data de tomadas das fotografias

Data	Campo	F (mm)	$\sigma_F$ (mm)	$x_o$ (mm)	$\sigma_{x_o}$ (mm)	$y_o$ (mm)	$\sigma_{y_o}$ (mm)	$k_1$ (mm <sup>-2</sup> )	$\sigma_{k_1}$ (mm <sup>2</sup> )	$k_2$ (mm <sup>-4</sup> )	$\sigma_{k_2}$ (mm <sup>-4</sup> )	$\hat{\sigma}_0^2$
16/11/06	P_6_1 N	35,973	0,015	-0,032	0,007	-0,028	0,007	-5,82e-5	2,52e-e6	3,16e-8	1,01e-8	0,699
09/02/07	P_7_1 N	35,975	0,008	0,153	0,008	0,139	0,004	-6,605e-5	1,066e-6	5,703e-8	2,46e-9	0,308
14/01/09	P_9_1 N	35,981	0,012	0,203	0,009	0,112	0,006	-7,140e-5	2,049e-6	7,005e-8	1,10e-8	0,439
30/01/09	G_9_1 N	35,936	0,088	0,052	0,021	0,131	0,020	-6,16e-5	3,07e-6	6,90e-8	9,42e-9	1,271
14/05/09	B_9_1 N	35,942	0,180	0,034	0,028	0,300	0,028	-6,72e-5	2,15e-6	6,00e-8	1,16e-8	0,724

F - Distância focal;  $x_o$ ,  $y_o$  - Coordenadas do ponto principal;  $k_1$ ,  $k_2$  - Parâmetros da distorção radial;  $\sigma$  - Desvio padrão;  $\hat{\sigma}_0^2$  - Variância *a posteriori*.

P\_8\_1 N



FONTE: O Autor.

Para verificar se a variância *a posteriori* é igual à variância *a priori* dentro de um nível de confiança de 95%, o teste do Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) foi aplicado para as cinco calibrações e os resultados são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados obtidos no teste de Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) na verificação das igualdades de variâncias resultantes nas cinco calibrações realizadas com a câmara Kodak

Campo	Grau de liberdade	Intervalo de confiança ( $\alpha = 95\%$ )		Variância <i>a posteriori</i>	Resultado do teste
P_6_1 N	938	0,633	0,758	0,69	Aceito
P_7_1 N	924	0,318	0,381	0,35	Aceito
P_9_1 N	972	0,449	0,536	0,49	Aceito
G_9_1 N	625	1,141	1,425	1,27	Aceito
B_9_1 N	975	0,664	0,792	0,72	Aceito

FONTE: O Autor.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 4, verifica-se que em todas as calibrações a variância *a posteriori* ficou dentro do intervalo de confiança

calculado, comprovando estatisticamente a igualdade das variâncias *a posteriori* e *a priori* ao nível de significância de 95%.

Na Tabela 5, são apresentados os erros quadráticos médios dos resíduos das fotocoordenadas e das coordenadas dos pontos de apoio resultantes dos ajustamentos realizados nas calibrações da câmara Kodak.

Tabela 5 - Erros quadráticos médios dos resíduos das fotocoordenadas e das coordenadas dos pontos de apoio, resultantes das calibrações realizadas com a câmara Kodak

P 6 1 N					G 9 1 N				
Fotocoordenadas		Pontos de Apoio			Fotocoordenadas		Pontos de Apoio		
RMS x (mm)	RMS y (mm)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)	RMS x (mm)	RMS y (mm)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)
0,004	0,004	0,001	0,001	0,002	0,003	0,002	0,001	0,002	0,003

P 7 1 N					B 9 1 N				
Fotocoordenadas		Pontos de Apoio			Fotocoordenadas		Pontos de Apoio		
RMS x (mm)	RMS y (mm)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)	RMS x (mm)	RMS y (mm)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)
0,002	0,004	0,001	0,001	0,002	0,004	0,003	0,009	0,010	0,003

P 9 1 N				
Fotocoordenadas		Pontos de Apoio		
RMS x (mm)	RMS y (mm)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)
0,002	0,003	0,001	0,001	0,002

RMS - Erro quadrático médio

FONTE: O Autor.

Analisando-se os resultados dos erros quadráticos médios apresentados na Tabela 5 e os resultados obtidos nos testes de Qui-quadrado ( $\chi^2$ ), conclui-se que os resultados dos ajustamentos realizados nas calibrações encontram-se de acordo com as precisões admitidas para as observações realizadas.

Como se pode verificar pelos erros quadráticos médios obtidos, os valores dos resíduos das fotocoordenadas encontram-se em conformidade com as precisões admitidas de  $\frac{1}{2}$  pixel (0,004 mm) para as observações dos alvos nas imagens. O mesmo se pode concluir sobre a acurácia dos resíduos das coordenadas tridimensionais dos pontos de apoio. Uma pequena perda de precisão foi verificada nas coordenadas Z dos alvos no campo terrestre plano, como pode ser comprovado pelos resultados dos erros quadráticos médios obtidos dos resíduos em Z, apresentados na Tabela 5. Essa pequena imprecisão, em torno de aproximadamente um milímetro, pode ser justificada pela variabilidade que estas

coordenadas sofrem pela dilatação da parede com a temperatura. Entretanto, por não fazer parte dessa pesquisa, essa hipótese de perda de precisão nas calibrações realizadas com o campo terrestre plano não foi investigada.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos das análises das verificações de correlações estatísticas entre os parâmetros de orientação interior determinados nos ajustamentos das calibrações realizadas com a câmara Kodak.

Tabela 6 - Correlações entre os parâmetros de orientação interior determinados nas calibrações realizadas com a câmara Kodak

P_6_1 N						G_9_1 N					
	F	$x_0$	$y_0$	$k_1$	$k_2$		F	$x_0$	$y_0$	$k_1$	$k_2$
F	1,000					F	1,000				
$x_0$	0,051	1,000				$x_0$	-0,177	1,000			
$y_0$	0,058	0,098	1,000			$y_0$	0,276	-0,071	1,000		
$k_1$	-0,363	-0,091	0,072	1,000		$k_1$	-0,468	0,176	-0,172	1,000	
$k_2$	0,297	0,019	-0,058	-0,904	1,000	$k_2$	0,420	-0,065	0,081	-0,901	1,000

P_7_1 N						B_9_1 N					
	F	$x_0$	$y_0$	$k_1$	$K_2$		F	$x_0$	$y_0$	$k_1$	$k_2$
F	1,000					F	1,000				
$x_0$	0,015	1,000				$x_0$	0,336	1,000			
$y_0$	0,144	-0,001	1,000			$y_0$	-0,210	-0,042	1,000		
$k_1$	-0,423	-0,036	-0,139	1,000		$k_1$	0,087	-0,031	-0,024	1,000	
$k_2$	0,321	0,009	0,103	-0,912	1,000	$k_2$	-0,003	0,052	0,004	-0,937	1,000

P_9_1 N					
	F	$x_0$	$y_0$	$k_1$	$K_2$
F	1,000				
$x_0$	-0,194	1,000			
$y_0$	0,288	-0,083	1,000		
$k_1$	-0,497	0,166	-0,204	1,000	
$k_2$	0,452	-0,073	0,147	-0,901	1,000

Onde: F - Distância focal;  $x_0$ ,  $y_0$  - Coordenadas do ponto principal;  $k_1$ ,  $k_2$  - Parâmetros da distorção radial.

FONTE: O Autor.

Analisando as correlações entre os parâmetros de orientação interior, apresentadas na Tabela 6, verifica-se que as correlações estatísticas entre os parâmetros são insignificantes, exceto para os parâmetros de distorção radial simétrica  $k_1$  e  $k_2$ , nos quais se verifica elevada correlação estatística em todas as calibrações realizadas. Essa correlação é considerada normal em função do modelo polinomial empregado para modelar o efeito da distorção radial nas fotocoordenadas, o que significa que o efeito pode ser modelado por um único parâmetro. Entretanto, nos ajustamentos realizados, a permanência do parâmetro  $k_2$  foi assumida, por ser o mesmo significativo na matriz variância-covariância e trazer



pequena melhoria nas precisões obtidas gerando melhor parametrização da distorção radial simétrica.

A Tabela 7 apresenta os resultados obtidos das análises das verificações de correlações estatísticas entre os parâmetros de orientação interior e de orientação exterior determinados nas calibrações realizadas com a câmara Kodak.

Tabela 7 - Médias em módulos dos valores das correlações estatísticas entre os parâmetros de orientação interior e exterior determinadas nas calibrações realizadas. - Câmara Kodak

P_6_1 N					
	F	x <sub>0</sub>	y <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>
<i>Omega</i>	0,101	y <sub>0</sub>	0,275	0,072	0,041
<i>Phi</i>	0,242	0,263	0,263	0,070	0,051
<i>Kappa</i>	0,036	0,293	0,296	0,044	0,031
Xo	0,609	0,091	0,125	0,053	0,048
Yo	0,160	0,105	0,107	0,061	0,046
Zo	0,787	0,040	0,089	0,034	0,055

G_9_1 N					
	F	x <sub>0</sub>	y <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>
<i>Omega</i>	0,094	0,129	0,137	0,057	0,025
<i>Phi</i>	0,553	0,214	0,200	0,211	0,071
<i>Kappa</i>	0,046	0,192	0,196	0,029	0,025
Xo	0,716	0,182	0,038	0,229	0,050
Yo	0,059	0,031	0,043	0,039	0,022
Zo	0,868	0,210	0,037	0,153	0,028

P_7_1 N					
	F	x <sub>0</sub>	y <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>
<i>Omega</i>	0,100	0,281	0,275	0,123	0,073
<i>Phi</i>	0,238	0,257	0,266	0,129	0,070
<i>Kappa</i>	0,058	0,286	0,271	0,065	0,041
Xo	0,598	0,094	0,124	0,130	0,060
Yo	0,142	0,090	0,087	0,112	0,073
Zo	0,707	0,042	0,069	0,042	0,027

B_9_1 N					
	F	x <sub>0</sub>	y <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>
<i>Omega</i>	0,181	0,116	0,121	0,046	0,040
<i>Phi</i>	0,393	0,256	0,158	0,075	0,034
<i>Kappa</i>	0,038	0,080	0,220	0,019	0,016
Xo	0,320	0,391	0,192	0,083	0,042
Yo	0,204	0,238	0,449	0,056	0,039
Zo	0,998	0,342	0,212	0,096	0,014

P_9_1 N					
	F	x <sub>0</sub>	y <sub>0</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>
<i>Omega</i>	0,139	0,220	0,306	0,104	0,092
<i>Phi</i>	0,253	0,267	0,263	0,155	0,087
<i>Kappa</i>	0,130	0,226	0,346	0,099	0,061
Xo	0,551	0,167	0,184	0,133	0,150
Yo	0,111	0,120	0,140	0,036	0,059
Zo	0,800	0,113	0,229	0,203	0,247

Onde: Omega, Phi e kappa - ângulos de Euler; Xo, Yo e Zo - Posição da câmara no momento da tomada da fotografia.

FONTE: O Autor.

Analisando-se os resultados apresentados na Tabela 7, verifica-se que as maiores correlações existentes em todas as calibrações estão relacionados com a distância focal e as coordenadas Xo e Zo das estações de exposição. Nas calibrações terrestres realizadas, tanto com a utilização do campo plano quanto do campo tridimensional, os valores de correlações mencionados são similares. Nos experimentos realizados, foi verificado que as correlações entre a distância focal e a

coordenada  $Z_o$  (afastamento horizontal do campo até a câmara) parecem possuir dependência com a convergência de fotos utilizadas nas calibrações. Na Tabela 8, apresentam-se os ângulos  $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$  de orientação das imagens empregadas nas calibrações terrestres. A soma em módulo do maior e o menor ângulo  $\omega$  nas estações extremas determina o ângulo de convergência existente entre as fotografias extremas empregadas na calibração. Verifica-se então que, nas calibrações realizadas no campo terrestre plano P\_9\_1 N, P\_6\_1 N e P\_7\_1 N, os ângulos de convergência foram  $73,56^\circ$ ,  $73,89^\circ$  e  $79,60^\circ$ , e os valores de coeficientes de correlação entre  $F$  e  $Z_o$  foram respectivamente de 0,800, 0,787 e 0,707. Na calibração realizada G\_9\_1 N, realizada no campo tridimensional, o ângulo de convergência foi de  $55,57^\circ$  e a correlação entre  $F$  e  $Z_o$  foi de 0,868.

As correlações existentes entre a distância focal e a coordenada  $X_o$  da estação de exposição (afastamento lateral do campo até a câmara), parecem possuir uma relação com a inclinação da câmara em relação ao eixo  $X$  terrestre (ângulo de orientação  $\phi$ ). Na Tabela 8, tem-se para as calibrações no campo terrestre plano P\_6\_1 N, P\_9\_1 N e P\_7\_1 N com ângulos de  $\phi$  de inclinação de  $15,16^\circ$ ,  $16,76^\circ$  e  $38,08^\circ$  obtiveram-se, respectivamente, valores de coeficientes de correlações de 0,609, 0,589 e 0,551. Para o campo tridimensional, na calibração realizada G\_9\_1 N com um ângulo de inclinação de  $8,35^\circ$ , obteve-se uma correlação de 0,716.

Conclui-se então que no caso do método de calibração das câmaras convergentes, quanto maior o ângulo de convergência menor será a correlação estatística entre a distância focal e a coordenada  $Z_o$  da estação de exposição, reafirmando as normas impostas, nas principais literaturas que tratam o assunto, para as tomadas das imagens. No caso da correlação da distância focal com o afastamento lateral da estação de exposição ( $X_o$ ), uma inclinação da câmara com o eixo  $X$  terrestre que não venha a prejudicar a identificação do alvo nas imagens, parece ser recomendável para melhorar essa correlação.

Deste modo, verifica-se que a melhor configuração geométrica para a quebra da correlação existente entre a distância focal e a coordenada  $Z_o$  da estação de exposição foi obtida na calibração no campo tridimensional, pois o pequeno valor obtido no ângulo de convergência ( $55,57^\circ$ ) deveria produzir um maior coeficiente de correlação, quando comparado com os valores obtidos no campo plano

Considerando os resultados obtidos nas análises de correlação no método proposto para a calibração com fotografias aéreas com base em recobrimentos realizados com diferentes alturas de voo, verifica-se a não existência de correlações entre os parâmetros de orientação interior e exterior, exceto a correlação existente entre a distância focal com a coordenada  $Z_o$  da estação de exposição. Devido à existência de somente um experimento com esta metodologia, atribui-se a inexistência de faixas transversais no centro do campo de prova como sendo a hipótese mais provável da existência dessa correlação.

Tabela 8 - Valores dos ângulos  $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$  das imagens empregadas nas calibrações P\_6\_1 N, P\_7\_1 N, P\_9\_1 N e G\_9\_1 N.

Fotografia	P_6_1 N			Fotografia	P_9_1 N		
	Phi	Omega	Kappa		Phi	Omega	Kappa
01	15,16°	-34,69°	007,37°	01	07,01°	02,54°	001,97°
02	12,34°	-30,81°	274,80°	02	03,93°	08,98°	273,13°
03	12,79°	-31,01°	186,14°	03	-05,30°	00,85°	182,66°
04	13,14°	-32,13°	096,17°	04	03,60°	-05,19°	089,31°
05	10,87°	-04,92°	000,72°	05	06,51°	32,78°	000,68°
06	07,23°	-03,62°	270,65°	06	-30,99°	30,33°	271,43°
07	08,88°	-06,58°	359,86°	07	-03,89°	33,80°	181,04°
08	06,35°	-04,22°	89,58°	08	33,29°	30,43°	087,74°
09	11,12°	32,82°	353,44°	09	09,93°	-30,76°	359,41°
10	12,12°	37,50°	262,71°	10	38,08°	-35,00°	278,68°
11	12,09°	39,20°	172,93°	11	-01,59°	-39,76°	184,16°
12	09,48°	36,85°	84,01°	12	07,12°	-32,12°	091,14°

Fotografia	P_7_1 N			Fotografia	G_9_1 N		
	Phi	Omega	Kappa		Phi	Omega	Kappa
01	16,76°	-35,72°	010,60°	01	6,91°	05,34°	000,85°
02	14,87°	-36,20°	278,82°	02	-3,00°	-00,03°	273,46°
03	15,03°	-35,10°	187,64°	03	-7,09°	-03,46°	180,84°
04	15,49°	-35,41°	099,59°	04	6,29°	02,02°	088,92°
05	12,35°	00,70°	000,22°	05	4,30°	30,36°	000,12°
06	12,37°	-03,50°	271,34°	06	-3,55°	29,34°	264,65°
07	08,57°	01,06°	178,90°	07	-6,82°	29,66°	182,02°
08	10,92°	-04,49°	090,66°	08	3,68°	30,00°	089,08°
09	12,56°	40,50°	350,77°	09	6,22°	-20,83°	000,12°
10	09,44°	40,28°	263,60°	10	2,17°	-11,37°	276,54°
11	11,36°	43,40°	172,00°	11	-8,35°	-23,31°	179,69°
12	09,64°	42,00°	84,87°	12	-5,49°	-25,21°	092,75°

FONTE: O Autor.

## 4.2 ANÁLISE DA ESTABILIDADE DA GEOMETRIA PROJETIVA DA CÂMARA KODAK DCS Pro 14n

A maioria dos testes estatísticos foi desenvolvida para ser aplicada em uma amostra que apresenta uma distribuição normal, esses testes são denominados paramétricos. Em amostras ditas pequenas ( $n < 30$ ), como é o caso, é imprescindível testar a normalidade da amostra para analisar a igualdade dos parâmetros de orientação interior, obtidos nas cinco calibrações realizadas com a câmara Kodak. Os testes estatísticos que necessitam da condição de normalidade, se aplicados em uma amostra que não possui a distribuição normal, poderão ter a sua análise comprometida.

O Teste de Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) pode ser utilizado para verificar a normalidade de uma amostra, porém, esse teste não pode ser empregado em uma amostra pequena. Nesse caso, vários pesquisadores têm utilizado, pela sua confiabilidade, o teste de normalidade desenvolvido por Filliben em 1975. Esse teste baseia-se em um gráfico de probabilidade denominado QQplot e no coeficiente de correlação. O teste consiste em calcular o coeficiente de correlação e compará-lo a valores tabelados em função do número de elementos que compõe a amostra e do nível de confiança a ser utilizado no teste (Tabela 31 no Anexo 1). A amostra será considerada normal se o coeficiente de correlação calculado for maior ou igual ao coeficiente de correlação tabelado e se o gráfico de probabilidade (QQplot) tender a uma reta.

Os parâmetros da orientação interior recuperados nas cinco calibrações foram considerados, de acordo com os testes de Filliben, com distribuição normal. Os cálculos dessa verificação são apresentados no Apêndice 4.

A dispersão dos valores em relação à média permite verificar a homogeneidade do conjunto de dados. Sabe-se que 90% dos indivíduos de uma população normal encontram-se no intervalo definido pela média e mais ou menos 1,6449 desvio padrão. Tendo-se como premissa essa consideração, os valores dos parâmetros de orientação interior, determinados nas cinco calibrações, foram comparados com os valores de suas médias, a fim de verificar se os resultados obtidos são equivalentes. Para tanto, o teste estatístico de Snedecor (F) foi aplicado.

O valor tabelado de F para uma amostra de 5 elementos (4,11) foi comparado com os valores calculados para a aplicação do teste estatístico. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados da verificação estatística da igualdade dos parâmetros de orientação interior nas calibrações realizadas

	F	$x_0$	$y_0$	$k_1$	$k_2$
F (calculado)	0,117	42,083	80,276	6,025	3,556
F (tabelado)	4,110	4,110	4,110	4,110	4,110
Resultado Teste	Aceita	Rejeita	Rejeita	Rejeita	Aceita

FONTE: O Autor.

Os resultados dos testes estatísticos mostram a estabilidade na distância focal e no parâmetro de distorção radial  $k_2$  nas cinco calibrações realizadas. Pode-se facilmente perceber que os afastamentos do ponto principal diferem consideravelmente nas calibrações aérea e na P\_6\_1 N.

Analisando o comportamento da distorção radial simétrica do sistema de lentes, verifica-se na Figura 21 que as curvas da distorção radial simétrica são equivalentes. As curvas de distorções obtidas com os parâmetros de distorção provenientes das calibrações realizadas no campo terrestre plano em 2007 e 2009 são praticamente coincidentes e essas curvas se sobrepõem em quase 86% com a curva de distorção obtida com os parâmetros de distorção da calibração realizada no campo terrestre plano em 2006. Nessas curvas, verifica-se que a máxima distorção radial simétrica foi de 0,427 mm, 0,391 mm e 0,396 mm, respectivamente. A curva de distorção proveniente da calibração terrestre no campo tridimensional, apesar de não ser tão coincidente com as provenientes da calibração terrestre com campo de calibração plano, apresenta similaridade com o conjunto. O afastamento médio entre as quatro curvas de distorção provenientes das calibrações terrestres não é maior que 0,010 mm. Com isto, pode-se concluir que as quatro calibrações determinaram parâmetros de distorção radiais simétricas semelhantes e, portanto, levando-se em consideração somente essas quatro calibrações, a câmara pode ser considerada estável neste quesito. Verifica-se na Figura 21 que o comportamento de distorção radial simétrica proveniente da calibração com fotografias aéreas é bem diferente dos comportamentos verificados nas calibrações terrestres. Uma das hipóteses prováveis para este afastamento pode estar relacionada à correlação existente com

a distorção e a refração fotogramétrica, explicando a não igualdade dos parâmetros  $k_1$  no teste estatístico realizado. Entretanto, a inexistência de outro experimento aéreo com características similares nas alturas de voo, inviabilizou a obtenção de conclusões seguras sobre essa hipótese.

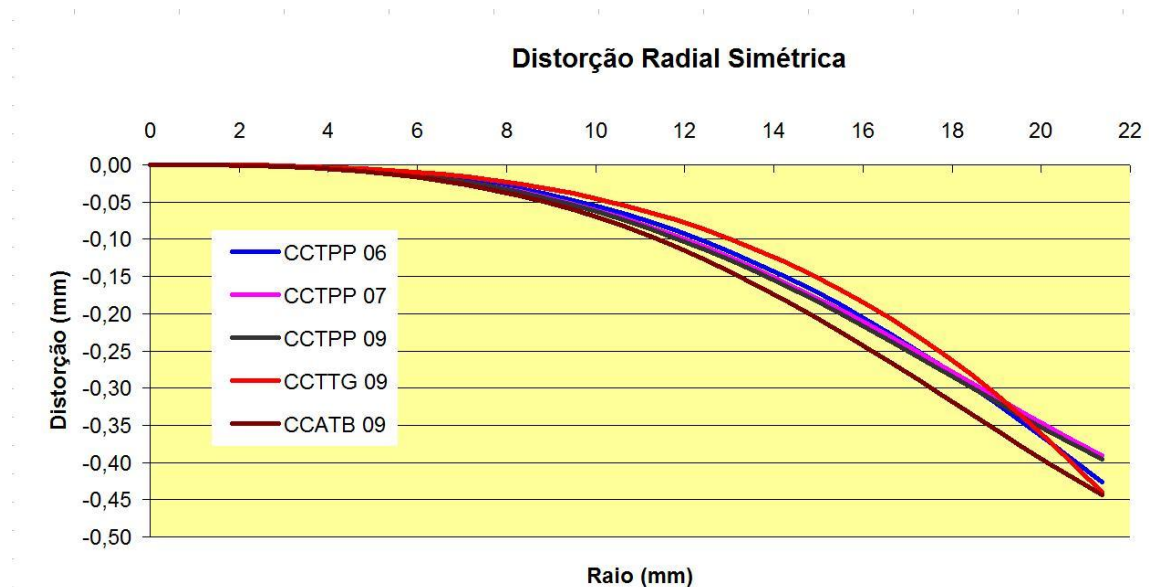


FIGURA 21 - DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA DA CÂMARA KODAK PARA AS CALIBRAÇÕES REALIZADAS EM 2006, 2007, 2009  
FONTE: O Autor.

O afastamento do ponto principal foi o parâmetro que apresentou a maior variabilidade, -0,032 a 0,203 mm no eixo x e -0,028 a 0,300 mm no eixo y. Essa variabilidade pode ser explicada pela não fixação da objetiva no corpo da câmara. Portanto, esse parâmetro, como já comprovado pelo teste estatístico, foi considerado instável.

Outra metodologia utilizada para verificar a estabilidade da câmara Kodak no período de tempo que as calibrações foram realizadas fez-se as análises dos resultados obtidos nos processamentos das aerotriangulações de um bloco de imagens, nas quais os erros sistemáticos de observações fotogramétricas foram corrigidos, empregando-se os cinco conjuntos de parâmetros de orientação interior obtidos.

As aerotriangulações foram utilizadas em um bloco de fotografias tomadas em 2006, com altura de voo de 1000 metros na região do aeroporto do Bacacheri. O bloco possui 21 fotografias tomadas em duas faixas com recobrimentos lateral e longitudinal aproximadamente iguais a 60%. As imagens possuem resolução do *pixel*

no terreno igual a 22,5 centímetros. Conforme esquema apresentado na Figura 22, o bloco, possui 43 pontos pré-sinalizados, sendo 12 usados com pontos de apoio e 31 como pontos de verificação,

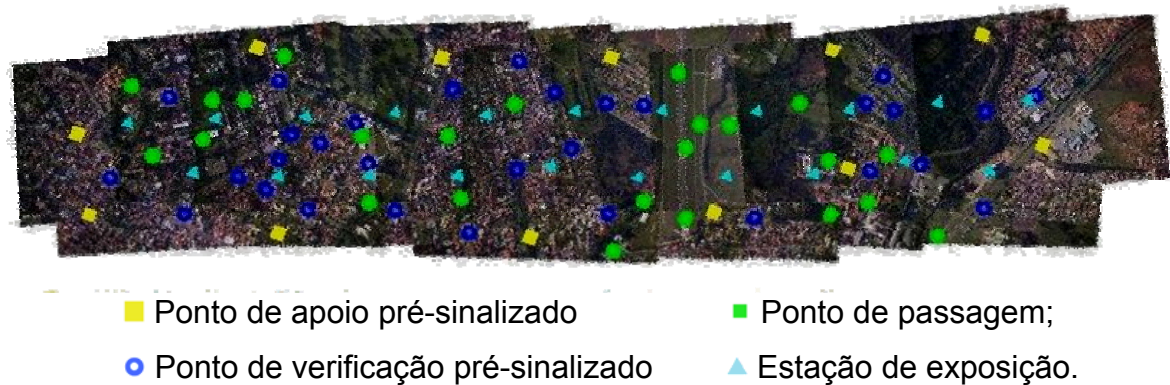


FIGURA 22 - ESQUEMA DO BLOCO DE IMAGENS, MOSTRANDO OS PONTOS DE APOIO, DE VERIFICAÇÃO, DE PASSAGEM E AS ESTAÇÃO DE EXPOSIÇÃO DE CADA FOTOGRAFIA  
 FONTE: O Autor.

Cinco processamentos de diferentes aerotriangulações foram realizados com os dados provenientes dos cinco conjuntos de parâmetros de orientação interior. Em todos os processamentos realizados adotou-se como variância *a priori* o valor unitário, desvio padrão das fotocoordenadas o valor de meio *pixel* (0,004 mm) e para os pontos de apoio o valor de um centímetro. As coordenadas dos pontos de apoio utilizados nas diversas aerotriangulações realizadas foram determinadas pelo método de posicionamento estático, obtendo um erro médio quadrático na determinação de sua posição inferior a um centímetro. Os resultados do ajustamento das aerotriangulações são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 - Principais resultados obtidos nas aerotriangulações realizadas com a câmara Kodak

Parâmetros	Aerotriangulações									
	P_6_1 N		P_7_1 N		P_9_1 N		G_9_1 N		B_9_1 N	
Variância a posteriori	1,458		1,133		0,792		1,399		1,272	
Intervalo de confiança 95%	1,22	1,77	0,95	1,37	0,66	0,96	1,17	1,69	1,07	1,54
Teste do qui-quadrado ( $\chi^2$ )	Aceito		Aceito		Aceito		Aceito		Aceito	
RMS x (mm)	0,004		0,004		0,003		0,004		0,003	
RMS y (mm)	0,003		0,001		0,001		0,001		0,001	
RMS X (m)	0,004		0,005		0,004		0,004		0,002	
RMS Y (m)	0,004		0,003		0,002		0,002		0,002	
RMS Z (m)	0,001		0,001		0,001		0,001		0,001	

FONTE: O Autor.

Analisando os resultados das cinco aerotriangulações, que são apresentados na Tabela 10, verifica-se que as variâncias *a posteriori* e as variâncias *a priori* são consideradas estatisticamente iguais no teste do Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) com intervalo de confiança de 95%. Os erros quadráticos médios calculados a partir dos resíduos das fotocoordenadas foram iguais ou inferiores à meio *pixel* (0,004 mm), admitidos como precisões para as observações na imagem. Os erros quadráticos médios calculados a partir dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio foram inferiores a um centímetro, admitidos como precisões para as observações no terreno. Portanto, pode-se afirmar que em todas as aerotriangulações realizadas com diferentes parâmetros de orientação interior, as precisões obtidas nos ajustamentos são similares e com resultados dentro do esperado. Desta forma, pode-se afirmar que a câmara possui comportamento estável para a realização de aerotriangulação por feixes de raios, dentro das precisões obtidas e do período de tempo das calibrações realizadas.

Para verificar as exatidões dos resultados obtidos nas aerotriangulações, valores de discrepâncias nas coordenadas dos pontos de verificação foram analisados. As coordenadas provenientes do levantamento geodésico (GPS) foram comparadas com as obtidas nas aerotriangulações. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 11.

**Tabela 11 - Discrepâncias em planimetria e altimetria obtidas nos pontos de verificação**

Parâmetros	Aerotriangulações									
	P_6_1 N		P_7_1 N		P_9_1 N		G_9_1 N		B_9_1 N	
Discrepância Planimétrica										
Média (m)	0,188		0,192		0,188		0,223		0,167	
RMS (m)	0,209		0,206		0,206		0,264		0,185	
Maior Discrepância (m)	0,429		0,338		0,335		0,432		0,406	
Nº de Discrepâncias entre 0 a 22,5 cm	23	74%	21	68%	20	65%	14	45%	25	81%
Nº de Discrepâncias entre 22,5 a 45 cm	08	26%	10	32%	11	35%	17	55%	06	19%
Discrepância Altimétrica										
Média (m)	-0,083		0,036		0,079		-0,044		-0,150	
RMS (m)	0,745		0,522		0,563		0,601		0,345	
Maior Discrepância (m)	1,474		1,061		1,212		1,493		0,857	
Nº de Discrepâncias ≤ 0,59m	18	58%	23	74%	22	74%	22	71%	29	94%
Nº de Discrepâncias entre 0,59 e 1,18 m	09	29%	08	26%	07	23%	07	23%	02	06%
Nº de Discrepâncias > 1,18 m	04	13%	00	00%	02	03%	02	06%	00	00%

FONTE: O Autor.

Câmaras de baixo custo têm distância focal e área de recobrimento pequena, e por isso, possuem menor precisão na determinação de coordenadas altimétricas



quando comparadas com as câmaras fotogramétricas que possuem maior distância focal e área de recobrimento. O valor da precisão altimétrica teórica de 0,59 m foi determinado com base na equação (17). A memória dos cálculos realizados é apresentada no Apêndice 5.

Na Figura 23 estão os gráficos das discrepâncias altimétricas obtidas das cinco aerotriangulações realizadas.

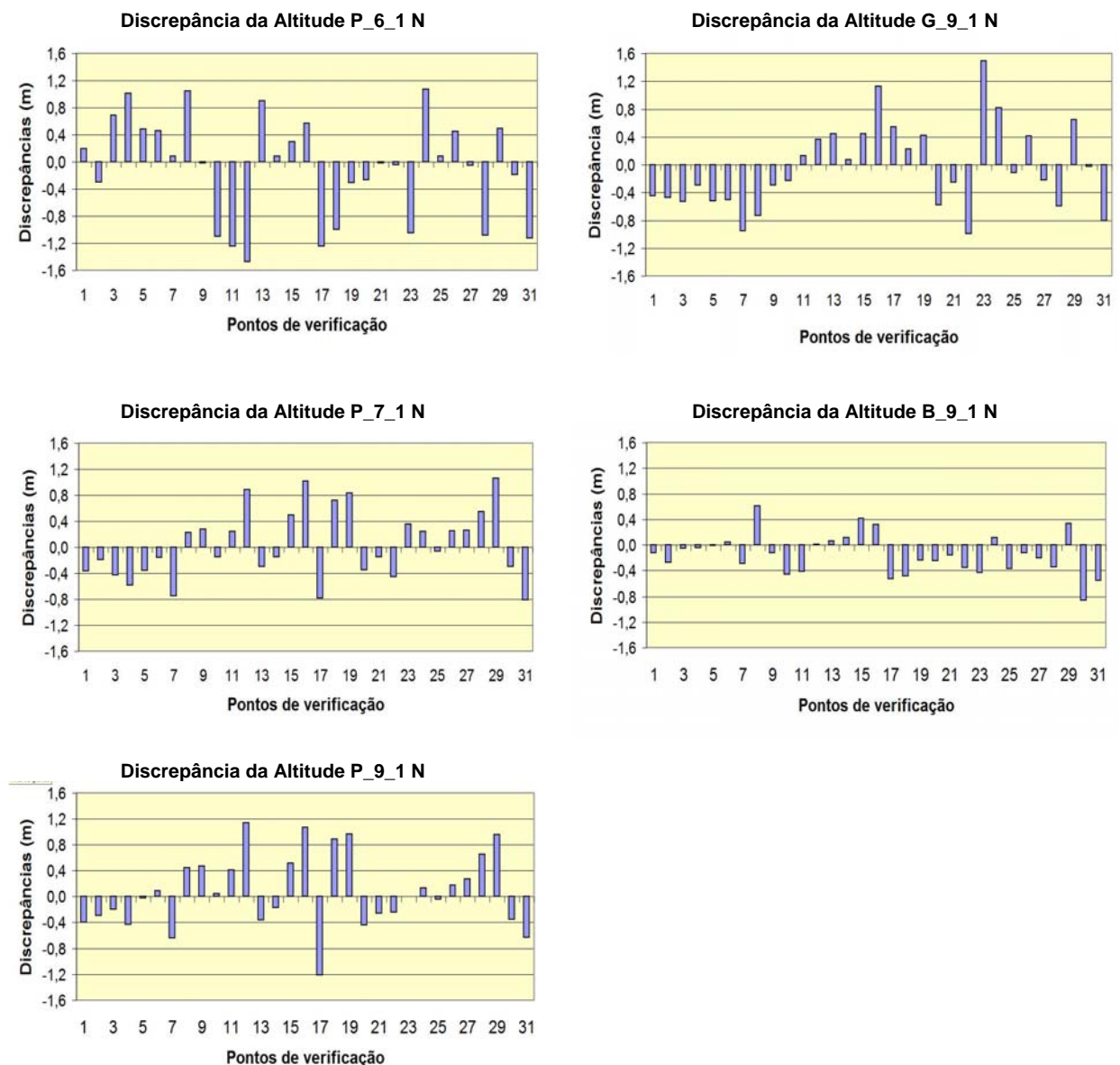


FIGURA 23 - GRÁFICO DAS DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS OBTIDAS DAS AEROTRIANGULAÇÕES REALIZADAS.  
FONTE: O Autor.

Analisando-se os resultados altimétricos apresentados na Tabela 11 e Figura 23 verifica-se que as discrepâncias altimétricas obtidas na aerotriangulação B\_9\_1 N

apresentaram uma pequena tendência em relação à média. Os resultados altimétricos obtidos nesse experimento encontram-se em média 15 cm mais altos em relação às altitudes determinadas com o levantamento em campo. Nos demais experimentos as discrepâncias altimétricas apresentaram distribuições próximas da normalidade.

Tomando-se como base os valores obtidos nos erros quadráticos médios das discrepâncias altimétricas, verifica-se que as exatidões altimétricas resultantes nas aerotriangulações P\_7\_1 N, P\_9\_1 N e B\_9\_1 N são inferiores ao valor da precisão altimétrica esperada. Nas demais aerotriangulações realizadas as exatidões altimétricas obtidas são superiores ao valor da precisão altimétrica esperada.

Analisando-se o conjunto de 155 discrepâncias altimétricas provenientes das cinco aerotriangulações realizadas, verifica-se que 144 foram menores que a discrepância altimétrica esperada, o que representa 76,5% do total. Tomando-se como base esse percentual de qualidade e comparando com os percentuais obtidos em cada uma das aerotriangulações realizadas, verifica-se que somente na aerotriangulação P\_6\_1 N o percentual médio de discrepâncias se afastou consideravelmente. Os resultados das discrepâncias altimétricas obtidos na aerotriangulação G\_9\_1 N, apesar de possuírem erro quadrático médio superior à precisão altimétrica esperada, o valor do percentual médio de discrepâncias aproxima-se do valor médio.

Com base na distribuição normal da amostra, estimou-se a média da exatidão altimétrica populacional existente em cada aerotriangulação. Essa média foi estimada com base na distribuição t-Student com o intervalo de confiança de 10% e 31 graus de liberdade. Os valores estimados para cada aerotriangulação são apresentados na Tabela 12. Os cálculos realizados são apresentados no Apêndice 7.

Tabela 12 - Valores da média estimada da exatidão altimétrica populacional para cada aerotriangulação

Parâmetro	Aerotriangulação - Altimetria				
	P_6_1 N	P_7_1 N	P_9_1 N	G_9_1 N	B_9_1 N
Dados Amostrais					
Média (m)	-0,083	0,036	0,079	-0,044	-0,150
Desvio Padrão (m)	0,752	0,530	0,567	0,609	0,316
Média da exatidão altimétrica populacional					
$\hat{\mu}(m)$	0,094	0,161	0,212	0,099	-0,076

FONTE: O Autor.

Um teste de hipótese foi realizado para verificar se a média da exatidão altimétrica populacional será igual ou inferior à exatidão altimétrica esperada. Portanto, realizou-se um teste de hipótese que confronta a hipótese  $H_0 : \mu \leq 0,588$  com a hipótese  $H_1 : \mu > 0,588$ , com um nível de significância de 10%. Aceita-se a hipótese  $H_0$  quando o valor da distribuição tabelado ( $t_{tab}$ ) em um certo nível de significância for maior que o valor calculado ( $t_{calc}$ ). Caso contrário, rejeita-se a hipótese.

Os valores calculados da distribuição t-Student, para cada aerotriangulação, são apresentados no Apêndice 8 e o resultado do teste de hipótese é mostrado na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultado do teste de Hipótese -  $\mu \leq 0,588$

	P_6_1 N	P_7_1 N	P_9_1 N	G_9_1 N	B_9_1 N
$t_{calc}$	-3,659	-4,490	-3,689	-4,469	-11,694
$t_{tab}$	1,309	1,309	1,309	1,309	1,309
Resultado do teste	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita

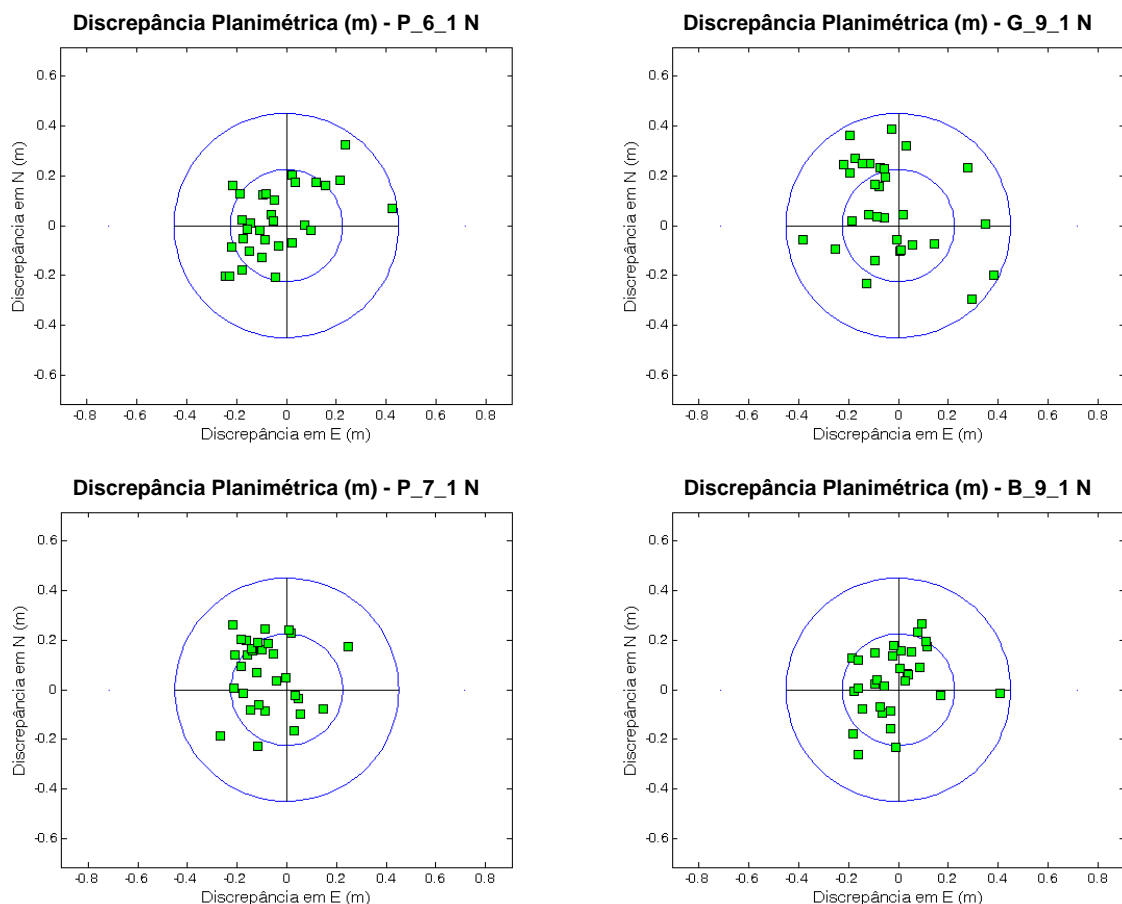
FONTE: O Autor.

Na Tabela 13, verifica-se que os valores calculados para a distribuição t-Student foram menores que o valor tabelado. Portanto, aceita-se a hipótese inicial. Com base nos resultados dos testes estatísticos realizados e apresentados na Tabela 13, pode-se concluir que as exatidões altimétricas obtidas nas cinco aerotriangulações podem ser consideradas estatisticamente iguais ou superiores ao valor da exatidão altimétrica esperada. Desta forma a câmara Kodak pode ser considerada estável (no período entre calibrações realizadas) para a realização de aerotriangulação por feixes de raios, visando à obtenção de dados altimétricos com exatidão média equivalente ao valor de exatidão teórica utilizada neste trabalho.

O método de calibração aéreo com base em duas alturas de voo não eliminou por completo a correlação entre a distância focal e a coordenada  $Z_0$  da estação de exposição, como pode ser visto no elevado desvio padrão (0,188 mm) obtido na determinação da distância focal e no coeficiente de correlação entre esses dois parâmetros. Entretanto, verifica-se que o melhor resultado altimétrico obtido foi na aerotriangulação que empregou parâmetros de orientação interior dessa calibração, no qual 94% das discrepâncias altimétricas foram inferiores ao valor do erro altimétrico esperado.

As aerotriangulações realizadas com as observações fotogramétricas corrigidas dos afastamentos da condição de colinearidade, empregando-se os parâmetros de orientação interior que foram determinados nas calibrações terrestres plano e tridimensional, apresentaram desempenhos similares na determinação altimétrica.

Na Figura 24, são apresentados os gráficos da distribuição das discrepâncias planimétricas obtidas pela diferença entre as coordenadas dos pontos de verificação, determinadas via levantamento geodésico GPS, e as obtidas por aerotriangulação (Apêndice 6). O círculo interno possui raio igual ao tamanho do *pixel* (0,225 m) no terreno e o círculo externo o dobro desse valor.



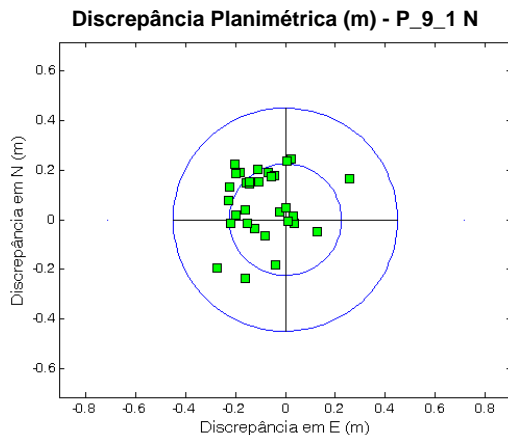


FIGURA 24 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS OBTIDAS NAS CINCO AEROTRIANGULAÇÕES  
 FONTE: O Autor.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 11 e na Figura 24, nota-se que:

- em todas as aerotriangulações realizadas não se verificou tendência acentuada nas distribuições das discrepâncias planimétricas com relação à média, evidenciando normalidade nestes dados;
- somente o RMS das discrepâncias planimétricas, calculado a partir dos resultados da aerotriangulação B\_9\_1 N, foi inferior ao tamanho do *pixel* no terreno. Nas aerotriangulações P\_6\_1 N, P\_7\_1 N e P\_9\_1 N o RMS planimétrico ficou 1,3 centímetros maior que o tamanho do *pixel* no terreno. Na aerotriangulação G\_9\_1 N o RMS planimétrico apresentou o maior valor, ficando 6,8 centímetros maior que o tamanho do *pixel* no terreno. Estes resultados evidenciam também, o melhor desempenho dos parâmetros de orientação interior provenientes da calibração CCTAB 09 nos experimentos realizados.

Analisando-se o conjunto das 155 discrepâncias planimétricas provenientes das cinco aerotriangulações realizadas, verifica-se que 103 foram inferiores a um *pixel* no terreno, o que representa 66,5% do total. Tomando-se como base esse percentual de qualidade e comparando com os percentuais obtidos em cada uma das aerotriangulações realizadas, verifica-se que somente na aerotriangulação G\_9\_1 N o percentual médio de discrepâncias se afastou consideravelmente.

Com base na distribuição normal da amostra, estimou-se a média da exatidão planimétrica populacional existente em cada aerotriangulação. Essa média foi estimada com base na distribuição t-Student com o intervalo de confiança de 10% e 31 graus de liberdade. Os valores estimados para cada aerotriangulação são apresentados na Tabela 14. Os cálculos realizados são apresentados no Apêndice 7.

Tabela 14 - Valores da média estimada da exatidão planimétrica populacional para cada aerotriangulação

Parâmetro	Aerotriangulação - Planimetria				
	P_6_1 N	P_7_1 N	P_9_1 N	G_9_1 N	B_9_1 N
Dados Amostrais					
Média (m)	0,188	0,192	0,188	0,237	0,167
Desvio Padrão (m)	0,093	0,078	0,086	0,117	0,081
Média da exatidão planimétrica populacional					
$\hat{\mu}(m)$	0,210	0,210	0,208	0,251	0,186

FONTE: O Autor.

Para verificar se a média da exatidão planimétrica populacional foi igual ou inferior à exatidão planimétrica esperada, realizou-se um teste de hipótese. Confrontou-se a hipótese  $H_0 : \mu \leq 0,225$  com a hipótese  $H_1 : \mu > 0,225$  (nível de significância de 10%). Aceitou-se a hipótese  $H_0$  quando o valor da distribuição tabelado ( $t_{\text{tab}}$ ) foi maior que o valor calculado ( $t_{\text{calc}}$ ), caso contrário, rejeitou-se a hipótese.

Os valores calculados da distribuição t-Student, para cada aerotriangulação, são apresentados no Apêndice 8 e o resultado do teste de hipótese é mostrado na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultado do teste de Hipótese -  $\mu \leq 0,225$

	P_6_1 N	P_7_1 N	P_9_1 N	G_9_1 N	B_9_1 N
$t_{\text{calc}}$	-0,906	-1,046	-1,086	1,214	-2,677
$t_{\text{tab}}$	1,309	1,309	1,309	1,309	1,309
Resultado do teste	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita

FONTE: O Autor.

Na Tabela 15, verifica-se que os valores calculados para a distribuição t-Student foram menores que o valor tabelado, portanto, aceita-se a hipótese inicial.

Com base nos resultados dos testes estatísticos realizados e apresentados na Tabela 15, pode-se concluir que as exatidões planimétricas obtidas nas cinco aerotriangulações podem ser consideradas estatisticamente iguais ou superiores ao valor da exatidão planimétrica de um *pixel*. Desta forma, a câmara Kodak pode ser considerada estável (no período entre as calibrações realizadas) para a realização de aerotriangulação por feixes de raios, visando à obtenção de dados planimétricos com exatidão média equivalente a um *pixel* no terreno.

Nas cinco aerotriangulações realizadas, verifica-se que a média das discrepâncias planimétricas foram todas inferiores ao tamanho do *pixel* no terreno e que não existiu nenhuma discrepância planimétrica superior a dois *pixels* no terreno.

Apesar das cinco aerotriangulações realizadas apresentarem resultados similares com aproximadamente iguais exatidões planimétricas, a aerotriangulação realizada com os parâmetros de orientação interior, determinados na calibração com fotografias aéreas, foi a que apresentou o melhor desempenho. Esse fato comprova que os melhores parâmetros de orientação interior para a realização da aerotriangulação, visando à obtenção de dados planialtimétricos, foram aqueles obtidos na calibração com fotografias aéreas, o que também confirma a proposta apresentada por Eisenhart (1963) *apud* Olivas (1980), da importância de calibrar instrumentos tão próximos quanto possível das condições que os mesmos serão utilizados.

O desempenho das aerotriangulações, realizadas com base nos parâmetros de orientação interior, provenientes das calibrações terrestres que empregaram os campos plano e tridimensional, apresentaram exatidões planimétricas similares, apesar da aerotriangulação que utilizou os parâmetros da calibração terrestre tridimensional ser a que apresentou o pior desempenho de exatidão planimétrica.

Portanto, como pode ser visto de forma global, os resultados de precisão e exatidão altimétricas e planimétricas, obtidos nas cinco aerotriangulações, podem ser consideradas estatisticamente iguais para um determinado nível de significância. Isto permite concluir que para a realização de uma aerotriangulação por feixes de raios, os parâmetros de orientação interior, necessários para a correção dos afastamentos da condição de colinearidade, poderão vir de qualquer um dos métodos de calibração propostos nesta pesquisa, pois os resultados obtidos nos experimentos realizados não apresentaram afastamentos significativos tanto em altimetria como em planimetria.

Por outro lado, comparando-se os valores dos parâmetros de orientação exterior das imagens do bloco, provenientes das cinco aerotriangulações, conforme dados apresentados na Tabela 16, verificou-se que houve grande modificação destes parâmetros, tanto na posição como na atitude. Essa variabilidade está correlacionada com a alteração da geometria projetiva provocada pela variabilidade dos parâmetros de orientação interior das diferentes calibrações realizadas.

Numa aerotriangulação convencional, as interseções dos raios são mantidas dentro de certa precisão fixas e, para compensar esse efeito, tanto a posição como a orientação das estações de exposição (Centro de Projeção) sofrem grandes modificações. Com base nesses resultados pode-se afirmar que a câmara Kodak somente apresenta estabilidade para a realização de aerotriangulação convencional, pois para uma aerotriangulação que requeresse a fixação das coordenadas dos centros de projeção ou dos ângulos dos parâmetros de rotação, a câmara provavelmente não seria considerada estável.

Tabela 16 - Erro quadrático médio determinado nas posições e atitudes da câmara nas cinco aerotriangulações realizadas com a câmara Kodak.

Fotografia	RMS Xo (m)	RMS Yo (m)	RMS Zo (m)	RMS Phi (grau)	RMS Ômega (grau)	RMS Kappa (grau)
1	1,88	4,70	12,74	0,11	0,15	0,02
2	2,30	5,41	12,79	0,10	0,08	0,01
3	2,71	4,85	12,75	0,13	0,05	0,01
4	2,38	4,27	12,79	0,15	0,10	0,01
5	2,93	3,92	12,86	0,16	0,10	0,02
6	3,26	3,97	12,86	0,12	0,07	0,01
7	2,14	4,89	12,99	0,09	0,13	0,01
8	2,21	5,73	12,89	0,09	0,07	0,01
9	2,81	5,39	12,99	0,08	0,10	0,02
10	2,00	5,39	12,99	0,08	0,10	0,02
11	4,00	6,44	12,90	0,11	0,26	0,03
12	3,90	5,26	13,17	0,08	0,23	0,01
13	3,07	5,87	12,87	0,07	0,14	0,00
14	2,64	6,43	12,86	0,08	0,09	0,00
15	2,24	5,22	12,57	0,09	0,09	0,01
16	2,14	6,42	12,35	0,08	0,15	0,01
17	2,74	4,84	12,50	0,10	0,09	0,01
18	2,27	5,38	12,57	0,10	0,18	0,03
19	2,44	5,18	12,58	0,10	0,14	0,02
20	3,04	5,78	12,91	0,04	0,10	0,01
21	3,85	6,19	12,48	0,17	0,09	0,01

FONTE: O Autor.



### 4.3 Resultados da Calibração da Câmara Sony DSC F828

Considerando um período de 17 meses, a câmara Sony DSC F828, teve a geometria projetiva recuperada sete vezes. Sendo cinco recuperações realizadas no campo de calibração terrestre plano Parede, uma no campo de calibração terrestre tridimensional Gabião e uma no campo de calibração aéreo tridimensional Bacacheri.

As imagens utilizadas para a realização das calibrações, empregando os campos de calibração terrestre plano Parede e terrestre tridimensional Gabião foram obtidas de acordo com a metodologia descrita no item 3.2.1.1.

As tomadas das imagens para a realização da calibração com fotografias aéreas inclinadas foram realizadas conforme a metodologia descrita no item 3.2.1.2.2. Com relação à tomada dessas fotografias, as seguintes considerações são apresentadas.

As fotografias aéreas para a calibração da câmara Sony DSC F828 foram tomadas no dia 09 de junho de 2009. Nesse voo foram planejadas 8 faixas, sendo 4 faixas perpendiculares ao campo de calibração tridimensional Bacacheri e 4 faixas paralelas a este. Devido ao intenso tráfego aéreo nas imediações do campo de calibração, as linhas de voo paralelas ao campo de calibração não puderam ser executadas, acarretando falhas no plano de voo planejado para a calibração.

A altura de voo foi de 270 metros acima do solo; a abertura do diafragma ficou no modo automático e o tempo de exposição ajustado para 1/1000s. O intervalo de tempo entre os disparos foi controlado manualmente pelo operador da câmara no momento do recobrimento. Nessa altura de voo, resultou para a resolução de um *pixel* no terreno o valor de 11 centímetros.

As quatro faixas foram tomadas com variabilidade no ângulo de rotação, conforme apresentado na Figura 25. Essas rotações foram realizadas com o objetivo de separar os coeficientes da distorção radial simétrica dos coeficientes da distorção descentrada. Para aproximar as tomadas das fotografias aéreas no método calibração proposto com o método das câmaras convergentes, todas as imagens tomadas nas quatro faixas foram inclinadas, manualmente pelo operador no instante da tomada.

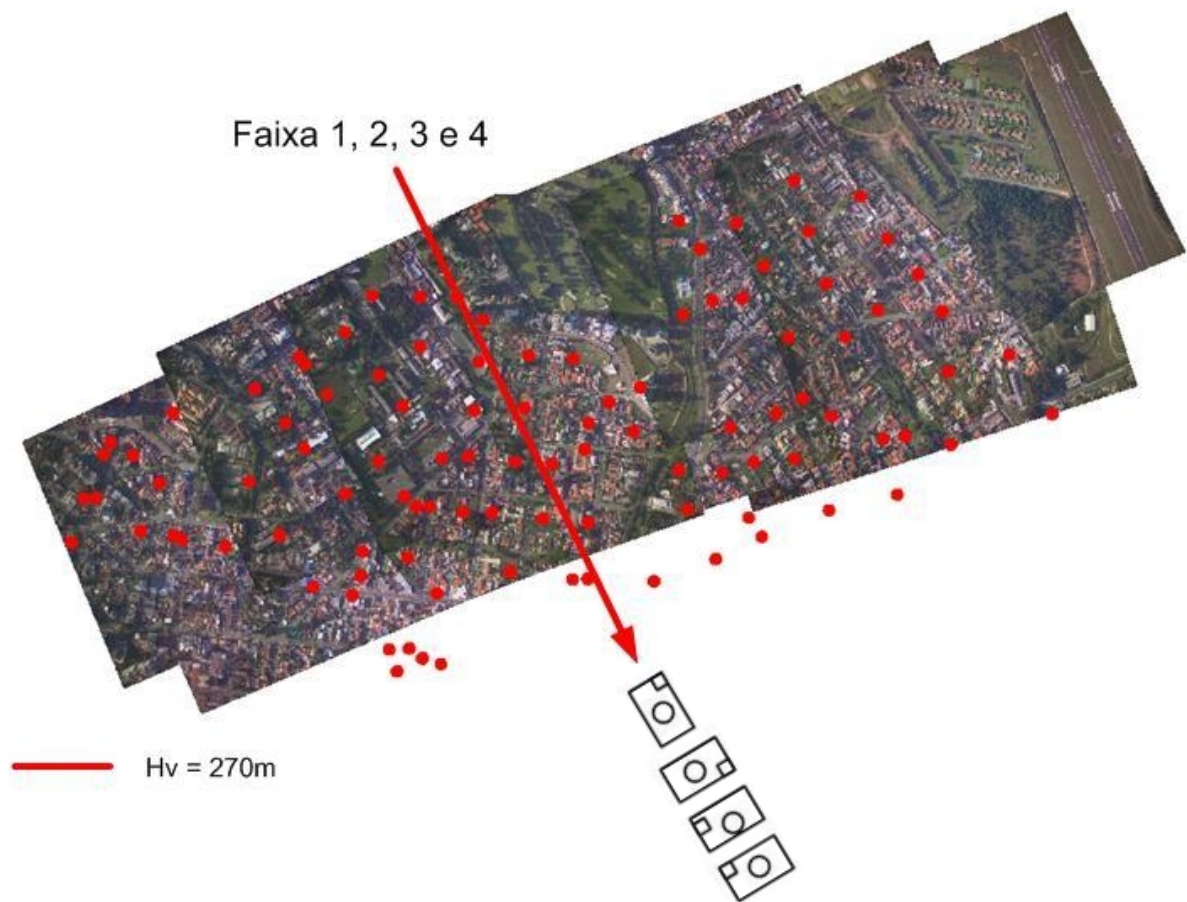


FIGURA 25 - ORIENTAÇÕES POSTAS NA CÂMARA EM CADA FAIXA DE VOO REALIZADA  
 FONTE: O Autor.

Numa fotografia inclinada, a escala diminui no sentido da inclinação. Isto pode ser visto na aérea abrangida pelos quadrados vermelhos situados nas bordas da fotografia posta na Figura 26. Devido à falta de controle da inclinação da câmara nas tomadas das imagens, ocorreu que as inclinações das imagens tomadas variaram de 30° a 45° graus. Nesse grau de inclinação, a diferença de escala inviabilizou a identificação e medida dos alvos situados à aproximadamente 30% da borda de menor escala o que acarretou uma redução da área útil da fotografia e diminuição do numero de alvos observados nas imagens. Para compensar a perda dos alvos devido à inclinação, foi aumentado o recobrimento longitudinal, permitindo que um mesmo alvo fosse observado em um maior número de fotografias. Por outro lado, a inclinação da fotografia provocou maior obstrução dos alvos por objetos situados na região do campo. Outro inconveniente encontrado com a imagem inclinada foi que a

mesma provocou modificação na forma do alvo e dificultou a identificação correta do seu centro.



FIGURA 26 - EXEMPLO DE UMA FOTOGRAFIA INCLINADA EMPREGADA NA CALIBRAÇÃO  
FONTE: O Autor.

Todas as fotografias utilizadas para a recuperação da geometria projetiva foram obtidas com a câmara configurada conforme descrito no item 3.2.1.2.2.

As fotocoordenadas dos alvos pré-sinalizados, existentes nos campos de calibração, foram medidas em cada fotografia por seleção manual do alvo e leitura monoscópica.

No ajustamento realizado para recuperar os parâmetros de orientação interior, foi atribuído à variância *a priori* o valor unitário, ao desvio padrão para as fotocoordenadas o valor de 0,00135 mm, equivalente, à meio *pixel* na imagem. Como empregado nas calibrações realizadas com a câmara Kodak, o desvio padrão adotado para as coordenadas dos pontos de apoio no campo de calibração plano Parede foi de um milímetro; no campo de calibração tridimensional Gabião, três milímetro; e no campo de calibração tridimensional Bacacheri, três centímetros.

Em todas as calibrações realizadas, os parâmetros da distorção descentrada e de distorção radial simétrica, não significativos na matriz variância e covariância, foram eliminados do ajustamento. Um novo ajustamento foi realizado considerando

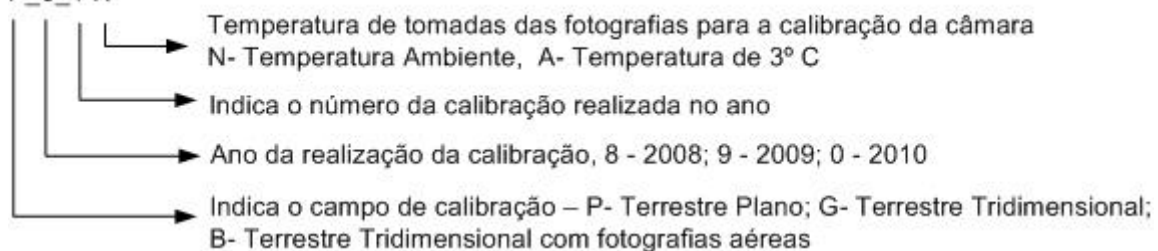
somente os parâmetros significativos. Na Tabela 17 são apresentados os parâmetros de orientação interior determinados nas diversas calibrações, realizadas com a câmara Sony, como também, a data da tomada das fotografias, o tipo do campo de calibração utilizado e a variâncias *a posteriori* obtidas no ajustamento.

Tabela 17 - Parâmetros de orientação interior significativos observados nas diversas calibrações com suas variâncias, e variância *a priori* e *a posteriori* do ajustamento

Data	Calibração	F (mm)	$\sigma_F$ (mm)	$x_o$ (mm)	$\sigma_{x_o}$ (mm)	$y_o$ (mm)	$\sigma_{y_o}$ (mm)	$k_1$ (mm <sup>-2</sup> )	$\sigma_{k_1}$ (mm <sup>-2</sup> )	$K_2$ (mm <sup>-4</sup> )	$\sigma_{k_2}$ (mm <sup>-4</sup> )	$\hat{\sigma}_0^2$
16/12/08	P_8_1 N	7,355	0,019	0,005	0,003	0,005	0,004	-2,983e-3	1,080e-4	2,362e-5	8,276e-6	0,713
26/01/09	P_9_1 N	7,385	0,007	0,018	0,004	0,017	0,004	-3,230e-3	6,017e-5	5,077e-5	2,324e-6	1,156
18/06/09	P_9_2 N	7,374	0,005	0,021	0,004	0,004	0,004	-3,103e-3	5,740e-5	4,848e-5	2,167e-6	0,935
26/09/09	P_9_3 N	7,388	0,004	0,025	0,003	0,004	0,003	-3,258e-3	4,350e-5	5,367e-5	1,456e-6	0,885
23/01/09	P_9_1 N	7,348	0,012	0,018	0,011	0,004	0,003	-2,773e-3	7,608e-5	-	-	0,343
30/01/09	G_9_2 N	7,359	0,007	0,015	0,003	0,003	0,002	-4,194e-4	5,197e-5	2,859e-5	2,386e-6	0,403
08/06/09	B_9_1 N	7,386	0,005	0,003	0,003	0,009	0,006	-3,212e-3	5,678e-5	5,136e-5	2,251e-6	1,070

Onde: F - Distância focal;  $x_o$ ,  $y_o$  - Coordenadas do ponto principal;  $k_1$ ,  $k_2$  - Distorção radial;  $\sigma$  - Desvio padrão;  $\sigma_0^2$  - Variância *a priori*;  $\hat{\sigma}_0^2$  - Variância *a posteriori*;

P\_8\_1 N



FONTE: O Autor.

Para verificar se a variância *a posteriori* foi igual à variância *a priori* dentro de um nível de confiança de 95%, o teste do Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) foi aplicado para as cinco calibrações apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Resultados obtidos no teste de Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) na verificação das igualdades de variâncias resultantes nas sete calibrações realizadas com a câmara Sony

Calibração	Grau de liberdade	Intervalo de confiança ( $\alpha = 95\%$ )		Variância <i>a posteriori</i>	Resultado do teste
P_8_1 N	482	0,631	0,812	0,713	Aceito
P_9_1 N	300	0,991	1,366	1,156	Aceito
P_9_2 N	274	0,796	1,113	0,935	Aceito
P_9_3 N	480	0,783	1,008	0,885	Aceito
P_9_1 N	268	0,292	0,409	0,343	Aceito
G_9_2 N	267	0,343	0,481	0,403	Aceito
B_9_1 N	99	0,825	1,444	1,070	Aceito

FONTE: O Autor.

Analisando os resultados apresentados na Tabela 18, verifica-se em todas as calibrações que a variância *a posteriori* ficou dentro do intervalo de confiança calculado, comprovando estatisticamente a igualdade das variâncias *a posteriori* e *a priori* ao nível de significância de 95%.

Na Tabela 19, são apresentados os erros quadráticos médios dos resíduos das fotocoordenadas e das coordenadas dos pontos de apoio resultantes dos ajustamentos realizados nas calibrações da câmara Sony.

Tabela 19 Erros quadráticos médios dos resíduos das fotocoordenadas e das coordenadas dos pontos de apoio, resultantes das calibrações realizadas com a câmara Sony.

P_8_1 N					P_9_1 A				
Fotocoordenadas		Pontos de Apoio			Fotocoordenadas		Pontos de Apoio		
RMS x (mm)	RMS y (mm)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)	RMS x (mm)	RMS y (mm)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)
0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001	0,001
P_9_1 N					G_9_1 N				
Fotocoordenadas		Pontos de Apoio			Fotocoordenadas		Pontos de Apoio		
RMS x (mm)	RMS y (mm)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)	RMS x (mm)	RMS y (mm)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)
0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001	0,001
P_9_2 N					B_9_1 N				
Fotocoordenadas		Pontos de Apoio			Fotocoordenadas		Pontos de Apoio		
RMS x (mm)	RMS y (mm)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)	RMS x (mm)	RMS y (mm)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)
0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,001	0,001	0,013	0,019	0,011
P_9_3 N									
Fotocoordenadas		Pontos de Apoio							
RMS x (mm)	RMS y (mm)	RMS X (m)	RMS Y (m)	RMS Z (m)					
0,001	0,001	0,002	0,001	0,001					

FONTE: O Autor.

Analisando-se os resultados dos erros quadráticos médios apresentados na Tabela 19 e os resultados obtidos nos testes de Qui-quadrado ( $\chi^2$ ), conclui-se que os resultados dos ajustamentos realizados nas calibrações encontram-se de acordo com as precisões admitidas para as observações realizadas.

Como se pode verificar pelos erros quadráticos médios obtidos, os valores dos resíduos das fotocoordenadas encontram-se em conformidade com as precisões admitidas de  $\frac{1}{2}$  pixel (0,00135 mm) para as observações dos alvos nas imagens. O mesmo se pode concluir sobre os valores das precisões resultantes dos resíduos

das coordenadas tridimensionais dos pontos de apoio. Uma pequena perda de precisão foi verificada nas coordenadas X dos alvos no campo terrestre plano, como pode ser comprovado com os resultados dos erros quadráticos médios obtidos dos resíduos em X, apresentados na Tabela 19. Esta pequena imprecisão, em torno de aproximadamente um milímetro, pode ser justificada pela variabilidade que estas coordenadas sofrem pela dilatação da parede com a temperatura. Entretanto, por não fazer parte dessa pesquisa, essa hipótese de perda de precisão nas calibrações realizadas com o campo terrestre plano não foi investigada.

A Tabela 20 apresenta os resultados obtidos das análises das verificações de correlações estatísticas entre os parâmetros de orientação interior determinados nos ajustamentos das calibrações realizadas com a câmara Sony.

Tabela 20 - Correlações entre os parâmetros de orientação interior determinados nas calibrações realizadas com a câmara Sony

P_8_1 N					
	F	$x_o$	$y_o$	$k_1$	$k_2$
F	1,000				
$x_o$	-0,129	1,000			
$x_o$	0,001	0,044	1,000		
$k_1$	-0,214	0,06	-0,03	1,000	
$k_2$	0,144	-0,054	-0,015	-0,822	1,000

G_9_1 N					
	F	$x_o$	$y_o$	$k_1$	$k_2$
F	1,000				
$x_o$	0,006	1,000			
$x_o$	0,336	0,041	1,000		
$k_1$	-0,135	-0,135	0,009	1,000	
$k_2$	0,081	-0,045	-0,178	-0,866	1,000

P_9_1 N					
	F	$x_o$	$y_o$	$k_1$	$k_2$
F	1,000				
$x_o$	-0,042	1,000			
$y_o$	0,157	-0,08	1,000		
$K_1$	-0,446	-0,004	-0,102	1,000	
$K_2$	0,367	-0,075	0,117	-0,923	1,000

P_9_1 A					
	F	$x_o$	$y_o$	$k_1$	$k_2$
F	1,000				
$x_o$	0,058	1,000			
$y_o$	-0,408	-0,1288	1,000		
$k_1$	-0,122	0,0746	0,338	1,000	
$k_2$	-	-	-	-	-

P_9_2 N					
	F	$x_o$	$y_o$	$k_1$	$k_2$
F	1,000				
$x_o$	0,201	1,000			
$y_o$	-0,252	-0,195	1,000		
$K_1$	-0,516	-0,075	0,226	1,000	
$K_2$	0,381	0,03	-0,177	-0,905	1,000

B_9_1 N					
	F	$x_o$	$y_o$	$k_1$	$k_2$
F	1,000				
$x_o$	-0,325	1,000			
$y_o$	-0,106	0,161	1,000		
$k_1$	-0,264	-0,099	-0,061	1,000	
$k_2$	0,373	0,005	0,131	-0,923	1,000

P_9_3 N					
	F	$x_o$	$y_o$	$k_1$	$k_2$
F	1,000				
$x_o$	0,122	1,000			
$y_o$	0,14	-0,122	1,000		
$k_1$	-0,476	-0,073	-0,134	1,000	
$k_2$	0,366	-0,009	0,02	-0,875	1,000

Onde: F - Distância focal;  $x_o$ ,  $y_o$  - Coordenadas do ponto principal;  $k_1$ ,  $k_2$  - Parâmetros da Distorção radial simétrica

FONTE: O Autor.

Analizando as correlações entre os parâmetros de orientação interior, apresentadas na Tabela 20, verifica-se que as correlações estatísticas entre os parâmetros são insignificantes. Exceto para os parâmetros de distorção radial simétrica  $k_1$  e  $k_2$ , que tem elevada correção estatística em todas as calibrações realizadas. Como nas calibrações realizadas com a câmara Kodak, essa correlação é considerada normal em função do modelo polinomial empregado para modelar o efeito da distorção radial nas fotocoordenadas o que significa que o efeito pode ser modelado por um único parâmetro, como no caso da calibração P\_9\_1 A. Entretanto, nos ajustamentos realizados, a permanência do parâmetro  $k_2$  foi assumida, por ser o mesmo, significativo na matriz variância e covariância e trazer pequena melhoria nas precisões obtidas pela melhor parametrização da distorção radial simétrica.

A Tabela 21 apresenta os resultados obtidos das análises das verificações de correlações estatísticas entre os parâmetros de orientação interior e de orientação exterior determinados nas calibrações realizadas com a câmara Sony

Tabela 21 - Médias em módulos dos valores das correlações estatísticas entre os parâmetros de orientação interior e exterior determinadas nas calibrações realizadas com a câmara Sony

P_8_1 N					
	F	$x_o$	$y_o$	$k_1$	$k_2$
Omega	0,071	0,430	0,287	0,167	0,042
Phi	0,155	0,374	0,434	0,082	0,055
Kappa	0,065	0,437	0,273	0,04	0,036
Xô	0,568	0,271	0,127	0,146	0,075
Yo	0,339	0,166	0,234	0,139	0,044
Zo	0,984	0,121	0,017	0,138	0,088

G_9_1 N					
	F	$x_o$	$y_o$	$k_1$	$k_2$
Omega	0,166	0,227	0,517	0,072	0,101
Phi	0,225	0,446	0,277	0,082	0,103
Kappa	0,117	0,18	0,393	0,050	0,084
Xo	0,526	0,115	0,266	0,052	0,097
Yo	0,281	0,05	0,137	0,085	0,067
Zo	0,898	0,051	0,315	0,054	0,044

P_9_1 N					
	F	x <sub>o</sub>	y <sub>o</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>
Omega	0,102	0,322	0,259	0,115	0,089
Phi	0,209	0,285	0,365	0,083	0,063
Kappa	0,079	0,306	0,277	0,039	0,054
Xô	0,457	0,23	0,173	0,044	0,043
Yo	0,289	0,166	0,273	0,104	0,063
Zo	0,775	0,137	0,119	0,063	0,073

P_9_2 N					
	F	x <sub>o</sub>	y <sub>o</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>
Omega	0,175	0,496	0,305	0,159	0,134
Phi	0,230	0,235	0,489	0,173	0,173
Kappa	0,158	0,477	0,291	0,097	0,059
Xô	0,578	0,231	0,236	0,121	0,099
Yo	0,068	0,177	0,18	0,071	0,076
Zo	0,629	0,153	0,15	0,064	0,048

P_9_3 N					
	F	x <sub>o</sub>	y <sub>o</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>
Omega	0,101	0,269	0,342	0,112	0,076
Phi	0,195	0,309	0,27	0,108	0,094
Kappa	0,076	0,255	0,347	0,064	0,02
Xô	0,508	0,159	0,114	0,065	0,093
Yo	0,082	0,131	0,135	0,09	0,073
Zo	0,597	0,087	0,052	0,071	0,052

P_9_1 A					
	F	x <sub>o</sub>	y <sub>o</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>
Omega	0,002	0,315	0,013	0,135	-
Phi	-0,083	-0,032	0,277	0,173	-
Kappa	0,024	-0,027	0,038	0,036	-
Xo	0,121	0,022	-0,064	0,054	-
Yo	-0,108	-0,018	0,043	-0,117	-
Zo	0,887	0,045	-0,363	-0,086	-

B_9_1 N					
	F	x <sub>o</sub>	y <sub>o</sub>	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>
Omega	0,081	-0,209	-0,121	0,009	-0,002
Phi	-0,082	0,132	-0,160	-0,019	-0,044
Kappa	0,047	-0,079	-0,325	-0,012	-0,008
Xo	-0,020	-0,021	-0,007	-0,012	-0,014
Yo	-0,145	0,043	-0,041	-0,008	-0,015
Zo	0,418	-0,231	-0,080	0,131	-0,017

Onde: F - Distância focal; x<sub>o</sub>, y<sub>o</sub> - Coordenadas do ponto principal; k<sub>1</sub>, k<sub>2</sub> - Distorção radial; Ômega, Phi e kappa - ângulos de Euler; Xo, Yo e Zo - Posição da câmara no momento da tomada da fotografia

FONTE: O Autor.

As mesmas correlações entre a distância focal e a coordenada Zo (afastamento horizontal do campo até a câmara), ocorridas nas calibrações realizadas com a câmara Kodak, são verificadas aqui com as calibrações com a câmara Sony e a dependência com o ângulo de convergência de fotos utilizadas nas calibrações também é confirmada. Na Tabela 22, apresentam-se os ângulos ômega, phi e kappa de orientação das imagens empregadas nas calibrações terrestres. A soma em módulo do maior e o menor ângulo ômega nas estações extremas determina o ângulo de convergência existente entre as fotografias extremas empregadas na calibração. Verifica-se então que nas calibrações no campo terrestre plano P\_8\_1 N, P\_9\_1 A e P\_9\_1 N, os ângulos de convergência foram 63,51°,



65,91° e 79,60°, resultando valores de coeficientes de correlações de 0,984, 0,887 e 0,775, respectivamente e para o campo tridimensional, na calibração realizada G\_9\_1 N com um ângulo de convergência de 59,30°, resultou uma correlação de 0,898.

Confirma-se a mesma conclusão anteriormente apresentada no caso da câmara Kodak. No método de calibração das câmaras convergentes, quanto maior o ângulo de convergência menor será a correlação estatística entre a distância focal e a coordenada Zo da estação de exposição.

Pelo resultado aqui obtido com a calibração da câmara Sony, no campo tridimensional, confirma-se a hipótese levantada anteriormente que o campo tridimensional possui melhor configuração geométrica para a quebra da correlação entre a distância focal e a coordenada Zo da estação de exposição, pois se verifica que um ângulo de convergência menor (59,30°) produziu um coeficiente de correlação bem próximo ao valor obtido no campo plano com um ângulo de convergência maior (65,91°).

Tabela 22 - Valores dos ângulos de atitude das fotografias usadas nas calibrações da câmara Sony

Foto	P_8_1 N			P_9_1 N			Foto	G_9_1 N			P_9_1 A		
	Phi	Omega	Kappa	Phi	Omega	Kappa		Phi	Omega	Kappa	Phi	Omega	Kappa
01	02,36	-01,36	001,54	16,76	-35,72	010,60	01	07,63	06,13	001,97	11,42	-30,83	100,28
02	02,42	03,27	179,08	14,87	-36,20	-081,18	02	-10,53	06,77	092,88	10,85	-28,48	007,68
03	07,92	01,31	091,32	15,03	-35,10	187,64	03	-03,74	02,92	002,35	06,23	-25,05	183,24
04	05,21	00,25	251,23	15,49	-35,41	099,59	04	-11,82	-28,35	178,52	04,23	-29,66	185,54
05	04,02	26,37	-001,52	12,35	00,70	000,22	05	-06,91	-28,24	-090,88	09,20	-04,59	094,14
06	06,66	28,37	091,52	12,37	-03,50	-088,66	06	-07,61	-26,78	089,88	05,40	00,03	002,96
07	02,98	31,37	183,52	08,57	01,06	178,90	07	-08,15	-25,42	002,57	10,49	03,98	175,57
08	00,12	24,37	259,52	10,92	-04,49	090,66	08	-11,14	29,28	186,13	-13,26	01,60	274,40
09	6,470	-26,890	2,570	12,56	40,50	-009,23	09	-04,53	30,22	000,99	10,77	30,38	083,88
10	08,09	-20,59	176,73	09,44	40,28	-096,40	10	-06,24	30,12	092,23	-03,90	32,73	004,71
11	08,94	-21,53	093,50	11,36	43,40	172,00	11	-05,78	30,95	-087,23	05,62	33,92	087,77
12	6,240	-32,240	294,510	09,64	42,00	084,87	12				08,90	34,04	170,06

Foto	P_9_2 N			B_9_1 N			Foto	P_9_3 N		
	Phi	Omega	Kappa	Phi	Omega	Kappa		Phi	Omega	Kappa
01	16,76	-39,72	10,60	8,69	6,01	295,37	01	01,79	00,88	-000,98
02	14,87	-42,20	-81,18	-13,61	42,88	301,44	02	07,14	-01,55	271,40

03	15,03	-42,10	187,64	19,72	-33,53	212,78	03	00,98	01,25	179,44
04	15,49	-41,41	99,59	16,65	-44,07	207,30	04	01,44	00,22	089,27
05	12,35	00,70	00,22	14,13	-37,68	210,87	05	07,67	36,56	-002,71
06	12,37	-03,50	-88,66	17,19	-36,60	214,31	06	05,65	39,55	270,25
07	08,57	01,06	178,90	44,88	8,07	113,72	07	02,91	41,12	178,59
08	10,92	-04,49	90,66	42,78	13,57	113,84	08	01,62	41,06	088,60
09	12,56	40,50	-09,23	41,80	9,47	112,29	09	05,73	-49,43	004,44
10	09,44	40,28	-96,40	1,76	-42,36	278,67	10	06,86	-49,07	279,25
11	11,36	43,40	172,00	-15,16	44,05	304,96	11	-00,53	-46,20	181,03
12	09,64	42,00	84,87	-13,91	42,34	302,88	12	05,24	-43,42	089,24
13	-	-	-	-13,134	42,427	302,055				

FONTE: O Autor.

#### 4.4 Análise da Estabilidade da Geometria Projetiva da Câmara Sony DSC F828

Os parâmetros da orientação interior recuperados nas sete calibrações foram considerados, de acordo com os testes de Filliben, como tendo uma distribuição normal. Os detalhes dessa verificação são apresentados no Apêndice 9.

Semelhante às calibrações realizadas com a câmara Kodak, o teste estatístico de Snedecor (F) com significância de 90%, foi aplicado para verificar a homogeneidade dos parâmetros de orientação interior determinados nas sete calibrações realizadas. O valor tabelado de F para uma amostra de sete elementos (3,05) foi comparado com os valores calculados. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 23.

Tabela 23 - Resultados da verificação estatística da igualdade dos parâmetros de orientação interior nas calibrações realizadas

	F	$x_0$	$y_0$	$k_1$	$k_2$
F (calculado)	3,86	2,03	0,94	1,37	0,61
F (tabelado)	3,05	3,05	3,05	3,05	3,05
Resultado Teste	Rejeita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita

FONTE: O Autor.

Os resultados dos testes estatísticos mostram instabilidade somente na distância focal nas sete calibrações realizadas. Visualmente pode-se perceber que

existe variabilidade de aproximadamente 0,040 mm no conjunto de distâncias focais apresentado na Tabela 17.

Analisando o comportamento da distorção radial simétrica do sistema de lentes, verifica-se visualmente na Figura 27 que as curvas da distorção radial simétrica são equivalentes. As curvas de distorções obtidas com os parâmetros de distorção provenientes das calibrações realizadas nos campo plano Parede (P\_9\_1 N, P\_9\_2 N, e P\_9\_3 N), no campo tridimensional Gabião (G\_9\_1 N) e no campo tridimensional Bacacheri (B\_9\_1 N) são praticamente coincidentes. Essas cinco curvas se sobrepõem em quase 80% com a curva de distorção obtida com os parâmetros de distorção da calibração realizada no campo terrestre plano P\_9\_1 A, que esta relacionada com a verificação da estabilidade da câmara com grande variação de temperatura (próxima de 3°C). Nessa calibração o comportamento de distorção radial simétrica é quase que coincidente com as cinco curvas, as distorções tornam-se maiores somente nas regiões mais afastadas do centro da imagem. A curva de distorção proveniente da calibração terrestre no campo plano P\_8\_1 N descreve uma trajetória similar e ligeiramente deslocadas das curvas provenientes das demais calibrações. Como o afastamento médio entre as cinco curvas de distorção provenientes das calibrações P\_9\_1 N, P\_9\_2 N, P\_9\_3 N, G\_9\_1 N e B\_9\_1 N não é superior a 0,005 milímetros, pode-se então concluir que as cinco calibrações determinaram parâmetros de distorção radiais simétricas semelhantes e, portanto levando-se em consideração somente essas cinco calibrações a câmara pode ser considerada estável neste quesito, confirmando os resultados estatísticos que ratificaram a homogeneidade dos sete parâmetros  $k_1$  e  $k_2$ . Diferente da calibração com fotografias aéreas realizada com a câmara Kodak que apresentou parâmetro  $k_1$  diferente do conjunto, na calibração com fotografias aéreas realizada com a câmara Sony, o mesmo parâmetro  $k_1$  foi considerado igual aos demais. A hipótese do parâmetro  $k_1$ , na câmara Kodak, ter absorvido parte dos efeitos da refração fotogramétrica parece aqui ter fundamento, pois na calibração da câmara Sony com fotografias aéreas, por ter baixa altura de voo, o efeito da refração não foi significativo para modificar o valor do referido parâmetro.

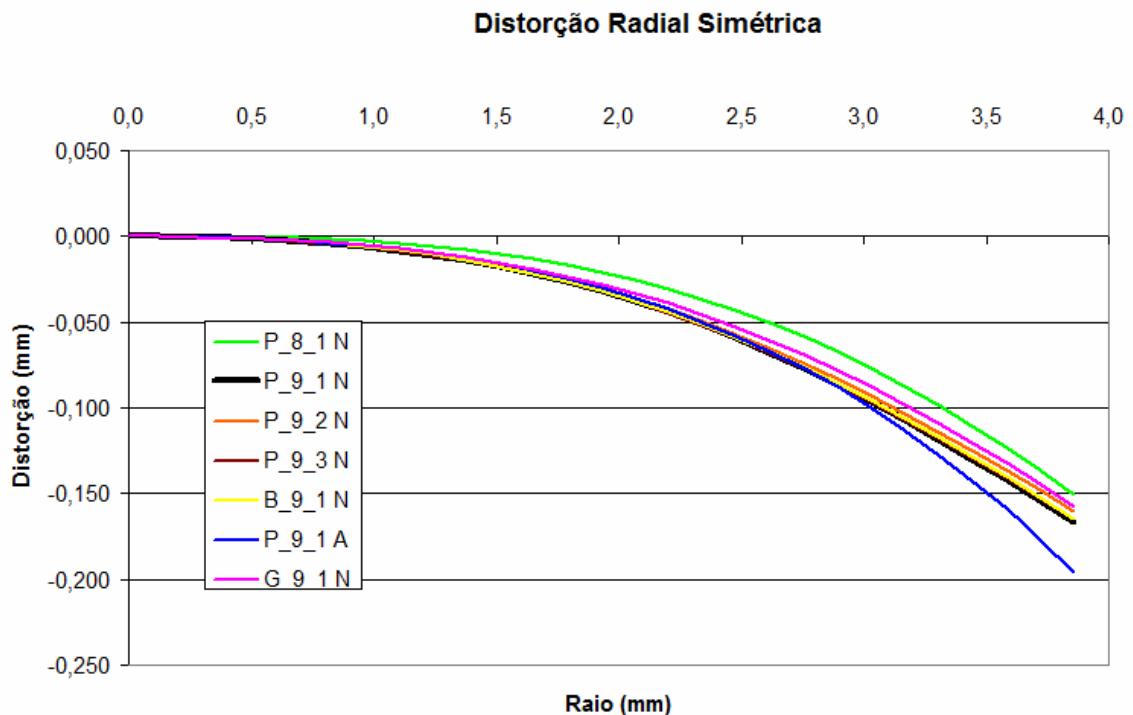


FIGURA 27 - DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA DA CÂMARA SONY PARA AS CALIBRAÇÕES REALIZADAS.  
FONTE: O Autor.

As coordenadas do ponto principal, obtidas nas sete calibrações, apresentaram para  $x_0$  e  $y_0$ , respectivamente, variabilidade no intervalo de 0,003 a 0,025 mm e de 0,000 a 0,017 mm, que equivalem à variação de oito e seis pixels. Essa variabilidade do ponto principal pode estar relacionada à dificuldade de manter distância focal no infinito nas sete calibrações realizadas, como também pela correlação que esses parâmetros possuem com as coordenadas das estações de exposição. Tendo em vista esses problemas, os afastamentos ocorridos podem ser considerados dentro de padrões normais de variabilidade, como foi comprovado pelo teste estatístico que considerou o conjunto homogêneo.

À semelhança da câmara Kodak, os testes de verificação da estabilidade da câmara Sony também fundaram-se nos resultados dos processamentos das aerotriangulações de um bloco de imagens, nos quais as observações fotogramétricas foram corrigidas dos erros sistemáticos, empregando-se os sete conjuntos de parâmetros de orientação interior.

Para a realização dos experimentos foi utilizado um bloco de fotografias tomadas em junho de 2009, na altura de voo de 275 metros na região do aeroporto do Bacacheri. O bloco possui cinco fotografias tomadas em uma única faixa com

recobrimento longitudinal de, aproximadamente, 80%. As imagens possuem resolução do *pixel* no terreno de, aproximadamente, onze centímetros. As fotografias aéreas desse bloco, apesar de possuir pequena inclinação, não foram empregadas no processo de calibração com fotografias aéreas inclinadas tratada nesta pesquisa. O bloco possui seis pontos de apoio pré-sinalizados e 28 pontos fotogramétricos naturais de ligação de fotos, conforme esquema apresentado na Figura 28.

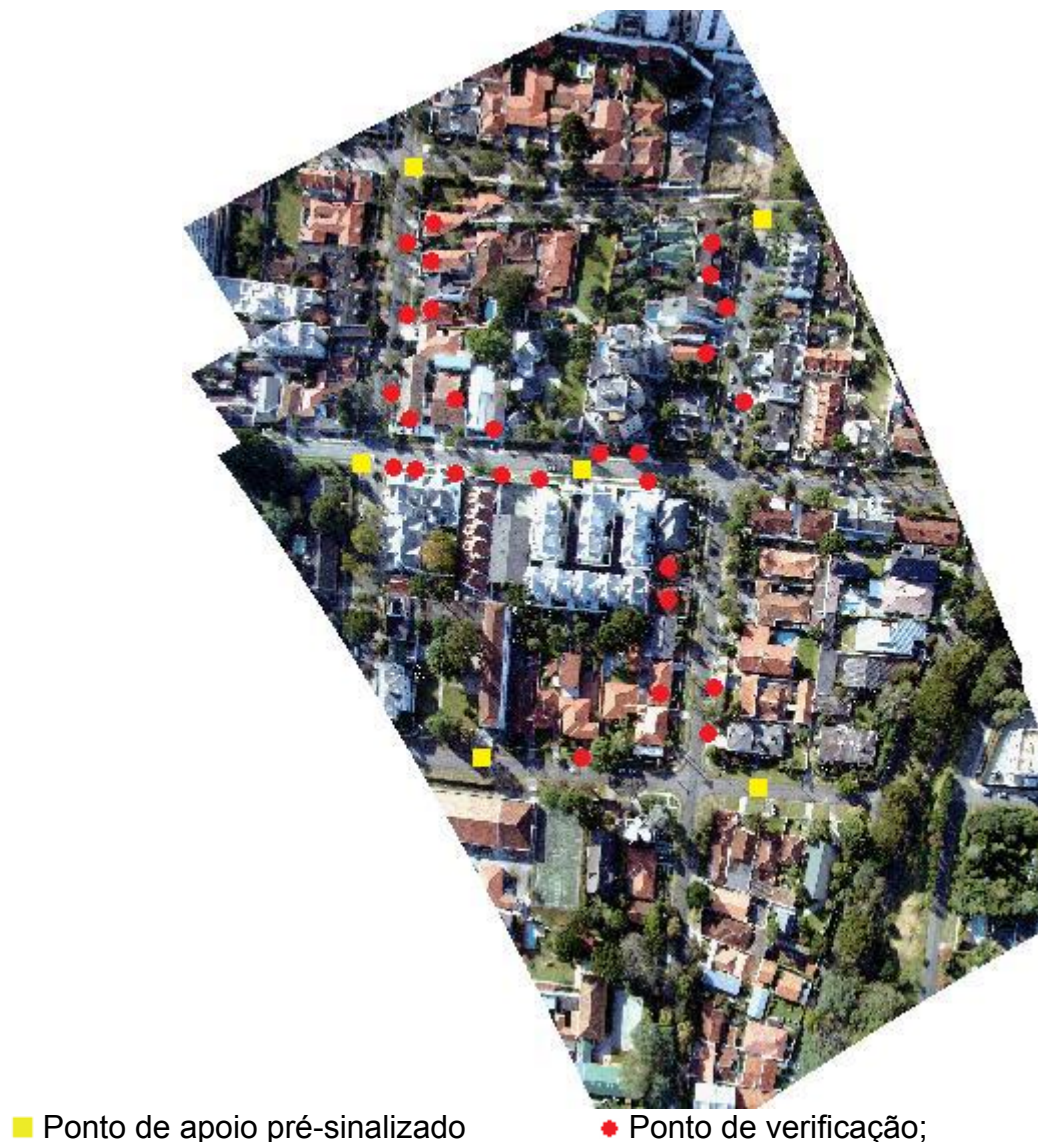


FIGURA 28 - ESQUEMA DO BLOCO AEROTRIANGULADO, MOSTRANDO OS PONTOS DE APOIO E DE LIGAÇÃO.  
 FONTE: O Autor.

Sete processamentos de diferentes aerotriangulações foram realizados com os dados provenientes dos sete conjuntos de parâmetros de orientação interior. Em

todos os processamentos realizados, adotou-se como variância *a priori* o valor unitário, para desvio padrão das fotocoordenadas o valor de um *pixel* (0,003 mm) e para os pontos de apoio, o valor de três centímetros. Os resultados do ajustamento das aerotriangulações são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24 - Principais resultados obtidos nas aerotriangulações realizadas com a câmara Sony

Parâmetros	Calibração e Campo de Calibração													
	P_8_1N		P_9_1N		P_9_2N		P_9_3N		P_9_1A		G_9_1N		B_9_1N	
Resultado do ajustamento														
Variância <i>a posteriori</i>	0,975		1,384		0,912		0,842		1,206		1,154		0,511	
Intervalo Confiança 95%	0,85	1,13	1,21	1,61	0,80	1,06	0,73	0,98	1,05	1,40	1,01	1,34	0,42	0,63
Resultado teste $\chi^2$	Aceito		Aceito		Aceito		Aceito		Aceito		Aceito		Aceito	
RMS x (mm)	0,003		0,003		0,002		0,003		0,003		0,003		0,005	
RMS y (mm)	0,004		0,005		0,003		0,003		0,002		0,003		0,003	
RMS X (m)	0,008		0,004		0,001		0,010		0,005		0,012		0,007	
RMS Y (m)	0,009		0,008		0,010		0,010		0,008		0,006		0,009	
RMS Z (m)	0,001		0,001		0,010		0,010		0,001		0,002		0,002	

FONTE: O Autor.

Analisando os resultados das sete aerotriangulações que foram apresentados na Tabela 24, verifica-se que as variâncias *a posteriori* e as variâncias *a priori* são consideradas estatisticamente iguais pelos testes do Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) realizados com intervalo de confiança de 95%. Os erros quadráticos médios calculados a partir dos resíduos das fotocoordenadas ficaram aproximadamente iguais a um *pixel* (0,003 mm) ou valor adotado como precisões para as observações na imagem. Os erros quadráticos médios, calculados a partir dos resíduos das coordenadas dos pontos de apoio, foram inferiores aos três centímetros admitidos como precisões para as observações no terreno. Portanto, pode-se afirmar que em todas as aerotriangulações realizadas com diferentes parâmetros de orientação interior, as precisões obtidas nos ajustamentos são similares e com resultados dentro do esperado. Desta forma, pode-se afirmar que a câmara possui comportamento estável para a realização de aerotriangulação por feixes de raios, dentro das precisões obtidas e no período de tempo das calibrações realizadas.

Para verificar as exatidões dos resultados obtidos nas aerotriangulações, as coordenadas geodésicas dos pontos fotogramétricos naturais foram obtidas com levantamentos topográficos e geodésicos. Essas coordenadas foram comparadas com as obtidas nas aerotriangulações para a determinação das suas discrepâncias

verticais e planimétricas. As análises de exatidões, resultantes das aerotriangulações realizadas, foram realizadas pela verificação das discrepâncias obtidas entre as coordenadas dos pontos de verificação determinadas por aerotriangulação e as coordenadas desses mesmos pontos provenientes de levantamento geodésico com receptores de sinais GPS. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Discrepâncias em planimetria e altimetria obtidas nos pontos de verificação – câmara Sony

Parâmetros	Aerotriangulações													
	P_8_1N		P_9_1N		P_9_2N		P_9_3N		P_9_1A		G_9_1N		B_9_1N	
Planimetria														
Média (m)	0,17		0,13		0,16		0,14		0,20		0,16		0,14	
RMS (m)	0,18		0,15		0,17		0,16		0,20		0,18		0,14	
Maior Discrepância (m)	0,30		0,29		0,29		0,28		0,29		0,29		0,29	
Nº de Discrepâncias entre 0 a 20cm	20	71%	22	79%	22	79%	22	79%	14	50%	19	68%	22	79%
Nº de Discrepâncias entre 20 a 40cm	08	29%	06	21%	06	21%	06	21%	14	50%	09	32%	06	21%
Altimetria														
Média (m)	0,34		-0,17		-0,33		-0,16		0,19		0,41		-0,21	
RMS (m)	0,55		0,42		0,61		0,43		0,37		0,59		0,50	
Maior Discrepância (m)	1,02		0,74		1,09		0,77		0,96		1,11		0,92	
Nº de Discrepâncias entre 0 a 74 cm	24	86%	27	96%	20	71%	26	93%	26	93%	22	79%	23	82%
Nº de Discrepâncias entre 74 a 148 cm	04	14%	01	04%	08	29%	02	07%	02	07%	06	21%	05	18%

FONTE: O Autor.

O valor da precisão altimétrica teórica foi determinado com base na relação altura de voo/distância focal. Porém, em função da pequena dimensão do pixel da câmara Sony (0,003mm) e para manter o mesmo padrão de exatidão empregado para a câmara Kodak, adotou-se o valor de 2 pixels para a precisão de paralaxe, nos experimentos de verificação das exatidões obtidas com a câmara Sony. Desta forma, empregando a equação 17, o valor de 0,74 m foi determinado como padrão de exatidão altimétrica e adotado para a verificação das aerotriangulações realizadas. A memória dos cálculos é apresentada no Apêndice 10.

Na Figura 29 estão os gráficos das discrepâncias altimétricas obtidas das sete aerotriangulações realizadas.

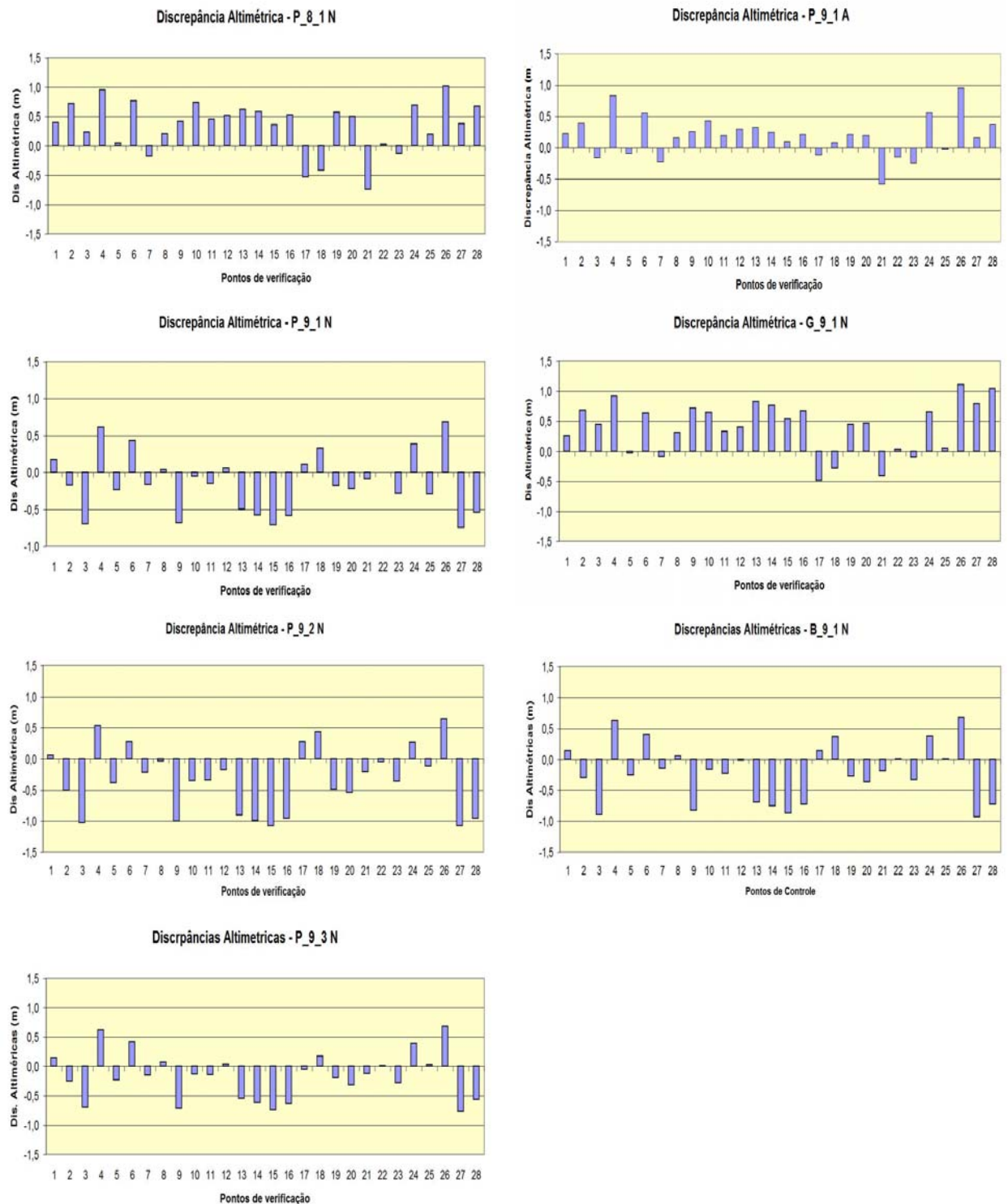


FIGURA 29 - DISCREPÂNCIAS ALTIMÉTRICAS ENTRE AS COORDENADAS DOS PONTOS DE VERIFICAÇÃO OBTIDAS COM GPS COM AS COORDENADAS OBTIDAS POR AEROTRIANGULAÇÃO  
 FONTE: O Autor.

Tomando-se como base os valores obtidos nos erros quadráticos médios das discrepâncias altimétricas, verifica-se que as exatidões altimétricas, obtidas nas sete



aerotriangulações realizadas, foram inferiores ao valor da exatidão altimétrica teórica adotado. Entretanto, da análise dos gráficos de distribuição das discrepâncias altimétricas, verifica-se, em todos os experimentos realizados, que as discrepâncias não apresentaram uma distribuição normal em relação à média. Ou melhor, existiu uma tendência em estimar a altitude de ponto ora para mais, ora para menos. Essa instabilidade está relacionada com a imprecisão da interseção fotogramétrica ocasionada pela pequena distância focal (7,371 mm) da câmara e pela reduzida base fotogramétrica ( $\cong 75$  metros), devido à pequena altura de voo (275 metros) e ao recobrimento longitudinal de 80%.

Analisando-se o conjunto das 196 discrepâncias altimétricas provenientes das sete aerotriangulações realizadas, verifica-se que 168 foram inferiores à discrepância altimétrica esperada, o que representa 85,7% do total. Tomando-se como base esse percentual de qualidade e comparando-o com os percentuais obtidos em cada uma das aerotriangulações realizadas, verifica-se que somente na aerotriangulação P\_9\_2 N o percentual médio de discrepâncias teve um pequeno afastamento (71%) dos valores médios. Analisando os valores dos parâmetros de orientação interior obtidos no experimento, verifica-se que os mesmos são bem próximos aos outros parâmetros, o que dificultou encontrar a causa da pequena perda de exatidão.

Com base na distribuição normal da amostra, estimou-se a média da exatidão altimétrica populacional existente em cada aerotriangulação. Essa média foi estimada com base na distribuição t-Student com o intervalo de confiança de 10% e 28 graus de liberdade. Os valores estimados para cada aerotriangulação são apresentados na Tabela 26. Os cálculos realizados são apresentados no Apêndice 12.

Tabela 26 - Valores da média da exatidão altimétrica populacional estimada para cada aerotriangulação - Câmara Sony

Parâmetro	Aerotriangulação - Altimetria						
	P_8_1N	P_9_1N	P_9_2N	P_9_3N	P_9_1A	G_9_1N	B_9_1N
Dados Amostrais							
Média (m)	0,34	-0,17	-0,33	-0,16	0,19	0,41	-0,21
Desvio Padrão (m)	0,43	0,44	0,53	0,40	0,33	0,43	0,47
Média da exatidão altimétrica populacional							
$\mu(m)$	0,44	-0,06	-0,20	-0,06	0,27	0,51	-0,10

FONTE: O Autor.

Para verificar se a média da exatidão altimétrica populacional foi igual ou inferior à exatidão altimétrica esperada, realizou-se um teste de hipótese. Confrontou-se a hipótese  $H_0 : \mu \leq 0,741$  com a hipótese  $H_1 : \mu > 0,741$  (nível de significância de 10%). Aceitou-se a hipótese  $H_0$  quando o valor da distribuição tabelado ( $t_{\text{tab}}$ ) foi maior que o valor calculado ( $t_{\text{calc}}$ ), caso contrário, rejeitou-se a hipótese.

Os valores calculados pela distribuição t-Student, para cada aerotriangulação, são apresentados no Apêndice 13 e o resultado do teste de hipótese é mostrado na Tabela 27

Tabela 27 - Resultado do teste de Hipótese -  $\mu \leq 0,741$

	P_8_1N	P_9_1N	P_9_2N	P_9_3N	P_9_1A	G_9_1N	B_9_1N
$t_{\text{calc}}$	-3,644	-9,666	-9,403	-10,629	-7,545	-2,783	-9,417
$t_{\text{tab}}$	1,313	1,313	1,313	1,313	1,313	1,313	1,313
Resultado do teste	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita

FONTE: O Autor.

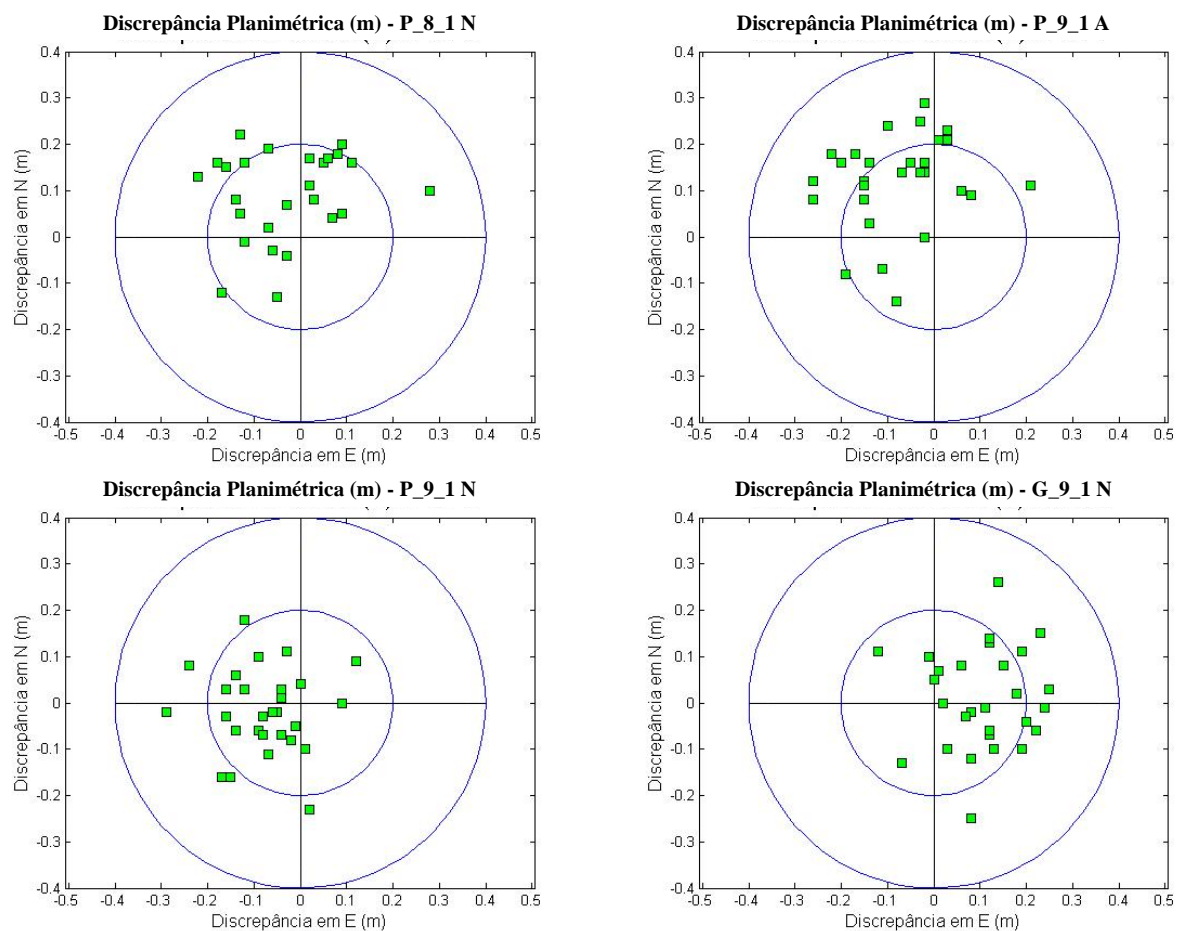
Na Tabela 27, verifica-se que os valores calculados para a distribuição t-Student foram menores que o valor tabelado. Portanto, aceita-se a hipótese inicial e conclui-se que as exatidões altimétricas obtidas das sete aerotriangulações podem ser consideradas estatisticamente iguais ou superiores ao valor da exatidão altimétrica esperada. Desta forma, a câmara Sony pode ser considerada estável, no período entre calibrações realizadas, para a realização de aerotriangulação por feixes de raios, visando à obtenção de dados altimétricos com exatidão média equivalente ao valor de exatidão teórica utilizada neste trabalho

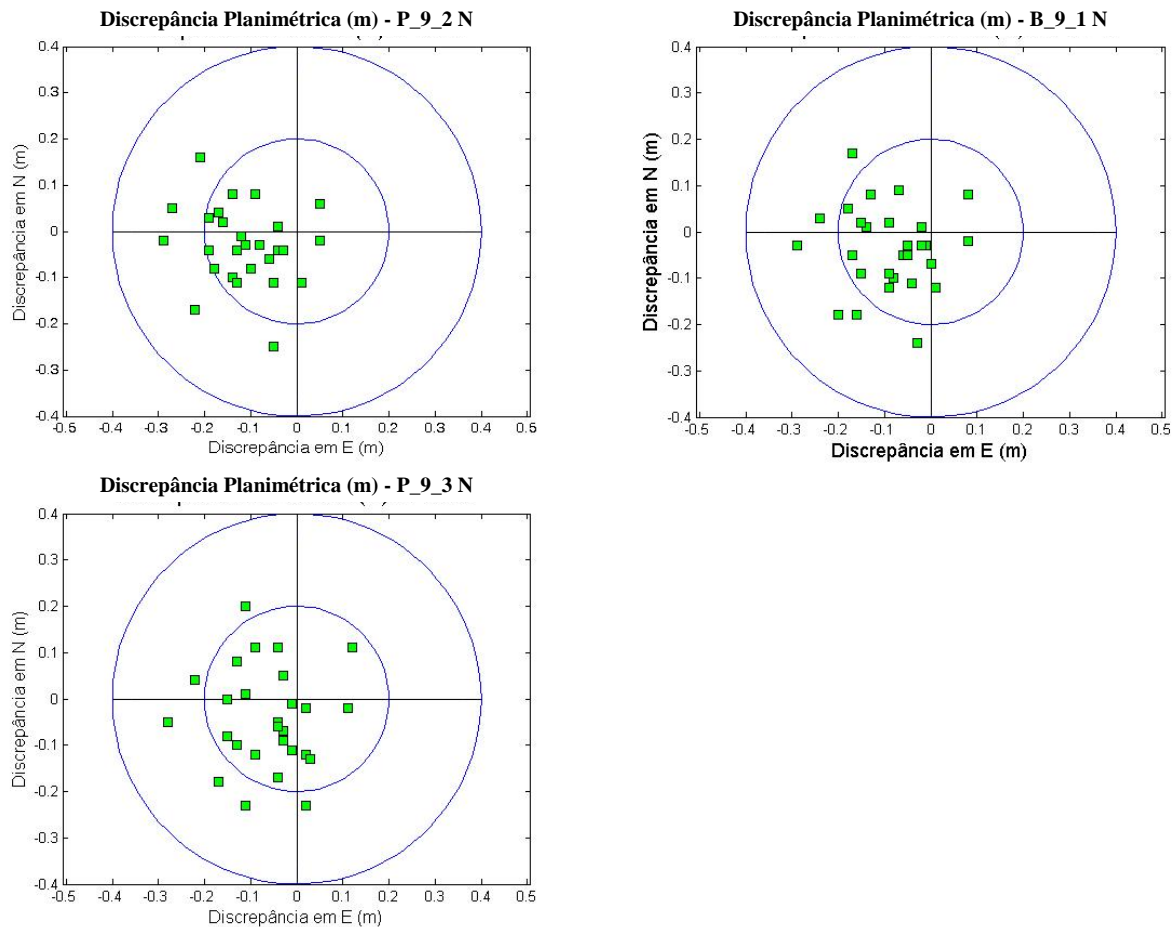
As aerotriangulações realizadas com as observações fotogramétricas corrigidas dos afastamentos da condição de colinearidade, empregando-se os parâmetros de orientação interior determinados nas calibrações propostas apresentaram desempenhos similares na determinação altimétrica.

Diferentemente da calibração realizada com câmara Kodak usando fotografias aéreas, a calibração da câmara Sony com fotografias aéreas não apresentou vantagens significativas na aerotriangulação, como era esperado por ser esta feita nas mesmas condições de trabalho. A baixa altura de voo, já discutida, fez com que o efeito relacionado com a refração fotogramétrica não fosse significativo no processo.

Outra conclusão importante está relacionada com os resultados obtidos na calibração P\_9\_1 A. Tal calibração procurou verificar se os parâmetros de orientação interior sofrem variações significativas com a grande variação da temperatura. Pelos resultados obtidos no experimento relacionado não se verificou nenhuma diferença na determinação altimétrica que pudesse concluir alguma instabilidade devido ao efeito.

Na Figura 30, são apresentados os gráficos da distribuição das discrepâncias planimétricas obtidas pela diferença entre as coordenadas, dos pontos de verificação (Apêndice 11). Os círculos possuem raios de 0,20 e 0,40 m, representando a resolução de dois e quatro *pixels* no terreno.





**FIGURA 30 - GRÁFICOS DAS DISTRIBUIÇÕES DAS DISCREPÂNCIAS PLANIMÉTRICAS OBTIDAS NAS SETE AEROTRIANGULAÇÕES**  
**FONTE: O Autor.**

Tomando-se como base os valores obtidos nos erros quadráticos médios das discrepâncias planimétricas, verifica-se que as exatidões planimétricas, obtidas nas sete aerotriangulações realizadas, foram no máximo igual ao valor da exatidão planimétrica teórica adotado. Entretanto, ao se analisar os gráficos de distribuição das discrepâncias planimétricas, verifica-se tendência de comportamento semelhante ao visto na altimetria. Entretanto, a tendência planimétrica acentua-se para um aspecto quase sistemático de determinação planimétrica nas aerotriangulações, com afastamento na direção x para oeste. Sendo a direção de tomada das fotografias aéreas, empregada nas aerotriangulações, realizada no sentido de sul para norte e a câmara inclinada para oeste, a hipótese mais provável para explicar essa tendência esta relacionada com a inclinação que as imagens possuem. A inclinação dificultou a perfeita identificação dos detalhes pontuais no processo de medida. Isto pode ter provocado um pequeno erro sistemático nas

medidas que causou essa pequena tendência, verificada nos experimentos realizados.

Analisando-se o conjunto das 196 discrepâncias planimétricas provenientes das sete aerotriangulações realizadas, verifica-se que 141 foram inferiores a dois *pixels* no terreno, o que representa 72% do total. Tomando-se como base esse percentual de qualidade e comparando-o com os percentuais obtidos em cada uma das aerotriangulações realizadas, verifica-se em somente uma das aerotriangulações realizadas que o percentual médio de discrepâncias se afastou consideravelmente. Trata-se da aerotriangulação realizada com os parâmetros de orientação interior vindos da calibração que analisou o comportamento da câmara com grande variação de temperatura. Diferentemente do caso altimétrico, onde o efeito não provocou alterações no processo, aqui a perda de exatidão planimétrica é evidente, pois 50% foi o percentual médio de discrepâncias planimétricas menores que dois *pixels*. Considerando estes resultados, pode-se inferir que a elevada diferença de temperatura provocou pequena instabilidade na geometria da câmara que acarretou menor exatidão planimétrica no experimento realizado.

Da mesma forma como ocorrido no caso altimétrico, a calibração usando fotografias aéreas não contribuiu de forma significativa para o aumento da exatidão planimétrica, como era esperado. As mesmas considerações postas no caso altimétrico, para essa não contribuição, são aqui também válidas. Por outro lado, considerando os resultados tanto da calibração usando fotografias aéreas como da aerotriangulação empregando os parâmetros dessa calibração, verifica-se que o procedimento proposto para a calibração usando fotografias aéreas inclinadas apresentou forte rigidez, como pode ser verificado na Tabela 21 por meio das insignificantes correlações entre os parâmetros de orientação interior e exterior, como também das altas precisões obtidas para os parâmetros de orientação interior, como podem ser vistas na Tabela 17.

Com base na distribuição normal da amostra, estimou-se a média populacional do erro planimétrico cometido em cada aerotriangulação. A média da população foi estimada com a distribuição *t*-Student para o intervalo de confiança de 10% e 28 graus de liberdade. A média estimada para o erro planimétrico de cada aerotriangulação é apresentada na Tabela 28. Os cálculos realizados para a estimativa da média da população estão no Apêndice 12.

Tabela 28 - Estimativa da média da população do erro planimétrico e altimétrico para cada calibração

Parâmetro	Aerotriangulação - Planimetria						
	P_8_1N	P_9_1N	P_9_2N	P_9_3N	P_9_1A	G_9_1N	B_9_1N
Dados Amostrais							
Média (m)	0,17	0,13	0,16	0,14	0,20	0,16	0,14
Desvio Padrão (m)	0,07	0,07	0,08	0,07	0,06	0,07	0,07
Média da exatidão planimétrica populacional							
$\hat{\mu}(m)$	0,19	0,15	0,18	0,16	0,21	0,18	0,16

FONTE: O Autor.

Para verificar se a média da exatidão planimétrica populacional foi igual ou inferior à exatidão planimétrica esperada, realizou-se um teste de hipótese. Confrontou-se a hipótese  $H_0: \mu \leq 0,20$  com a hipótese  $H_1: \mu > 0,20$  (nível de significância de 10%). Aceitou-se a hipótese  $H_0$  quando o valor da distribuição tabelado ( $t_{\text{tab}}$ ) foi maior que o valor calculado ( $t_{\text{calc}}$ ), caso contrário, rejeitou-se a hipótese.

Os valores calculados da distribuição t-Student, para cada aerotriangulação, são apresentados no Apêndice 12 e o resultado do teste de hipótese é mostrado na Tabela 29.

Tabela 29 - Resultado do teste de Hipótese -  $\mu \leq 0,20$ 

	P_8_1N	P_9_1N	P_9_2N	P_9_3N	P_9_1A	G_9_1N	B_9_1N
$t_{\text{calc}}$	-0,978	-4,001	-1,356	-3,245	1,290	-1,734	-3,245
$t_{\text{tab}}$	1,313	1,313	1,313	1,313	1,313	1,313	1,313
Resultado do teste	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita	Aceita

FONTE: O Autor.

Na Tabela 29, verifica-se que os valores calculados para a distribuição t-Student foram menores que o valor tabelado, portanto, aceita-se a hipótese inicial.

Com base nos resultados dos testes estatísticos realizados e apresentados na Tabela 29 pode-se concluir que as exatidões planimétricas obtidas nas sete aerotriangulações podem ser consideradas estatisticamente iguais ou superiores ao valor da exatidão planimétrica de dois *pixels*. Desta forma a câmara Sony pode ser considerada estável (no período entre calibrações realizadas) para a realização de aerotriangulação por feixes de raios, visando à obtenção de dados planimétricos com exatidão média equivalente a dois *pixels* no terreno.

O desempenho das aerotriangulações, realizadas com base nos parâmetros de orientação interior, provenientes das sete calibrações realizadas, apresentaram exatidões planimétricas similares. A aerotriangulação P\_9\_1 A que utilizou os parâmetros da calibração realizada com grande variabilidade de temperatura teve o mesmo padrão de qualidade de exatidão planimétrica das demais aerotriangulações.

Portanto, como pode ser visto de forma global, os resultados de precisão e exatidão altimétricas e planimétricas, obtidos nas sete aerotriangulações, podem ser consideradas estatisticamente iguais para um determinado nível de significância estatística. Semelhante ao concluído para a câmara Kodak, para a realização de uma aerotriangulação por feixes de raios, os parâmetros de orientação interior, necessários para a correção dos afastamentos da condição de colinearidade, poderão vir de qualquer um dos métodos de calibração propostos nesta pesquisa, pois os resultados obtidos nos experimentos realizados não apresentaram afastamentos significativos tanto em altimetria como em planimetria.

Como visto no caso da câmara Kodak, comparando-se os valores dos parâmetros de orientação exterior das cinco fotografias do bloco, provenientes das sete aerotriangulações, conforme dados apresentados na Tabela 30, verificou-se que houve grande variação destes parâmetros, tanto na posição como na atitude. As discussões apresentadas sobre a variabilidade desses parâmetros no caso da câmara Kodak e sua estabilidade geométrica podem também ser consideradas aqui para o caso da câmara Sony.

Tabela 30 - Erro quadrático médio determinado nas posições e atitudes da câmara nas cinco fotografias usadas nas aerotriangulações realizadas com a câmara Sony.

Fotografia	RMS Xo (m)	RMS Yo (m)	RMS Zo (m)	RMS Phi (grau)	RMS Omega (grau)	RMS kappa (grau)
1	2,842	15,996	1,701	3,279	0,545	0,096
2	1,942	8,742	4,395	1,771	0,384	0,070
3	5,218	2,932	4,208	0,545	1,084	0,092
4	6,185	5,752	2,997	1,032	1,212	0,196
5	8,178	10,487	2,456	1,880	1,547	0,318

FONTE: O Autor.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Atualmente, devido às facilidades proporcionadas na aquisição de imagens digitais, manuseio e operação de câmaras digitais de baixo custo, associadas ao custo descrente e à melhoria das resoluções radiométrica e geométrica dos sensores baseados na tecnologia CCD e CMOS, verifica-se cada vez mais uma tendência crescente na utilização dessas câmaras nas aplicações fotogramétricas. Entretanto, os conhecimentos dos parâmetros que permitem recuperar a sua geometria projetiva, como também da estabilidade geométrica num dado período de utilização, podem ser considerados como sendo os dois principais pré-requisitos básicos de utilização dessas câmaras na Fotogrametria. Por essas razões, o presente trabalho de pesquisa tratou fundamentalmente da análise da estabilidade geométrica de duas câmaras digitais de baixo custo usando vários métodos de calibração de câmaras visando aplicações na aerotriangulação por feixes de raios (Bundle Adjustment). Apesar desta temática de pesquisa ser amplamente conhecida e discutida nas Ciências Geodésicas, verifica-se que ainda não foi consolidada uma única metodologia para a avaliação da estabilidade geométrica de uma câmara digital de baixo custo.

Com base nos resultados obtidos dos experimentos realizados, apresentam-se as principais conclusões e recomendações.

Considerando os resultados obtidos tanto nos erros quadráticos médios dos resíduos das observações na imagem e no terreno, como também nos testes estatísticos que mediram a igualdade de variâncias *a priori* com a variância *a posteriori* nos ajustamentos realizados, conclui-se que todas as calibrações realizadas alcançaram precisões iguais as admitidas de  $\frac{1}{2}$  pixel ou em todas as calibrações realizadas, os parâmetros de orientação interior foram determinados de acordo com as precisões admitidas nas observações.

De modo geral as calibrações terrestres empregando tanto campo de calibração plano como tridimensional apresentaram resultados similares, impossibilitando conclusões mais consistentes sobre o desempenho superior de um dos campos.

Foi verificado, nos métodos de calibração terrestre empregando campo plano ou tridimensional, que o ângulo de convergência entre fotos tomadas das estações



extremas é fortemente dependente da correlação entre a distância focal e a coordenada da estação de exposição  $Z_0$ , ou seja, quanto mais próximo de  $90^\circ$  for o ângulo de convergência menor será essa correlação. Nesse caso, foi verificado que o campo tridimensional possui maior rigidez para quebrar este tipo de correlação;

O método de calibração usando fotografias aéreas com base em duas alturas de voo, apesar de resultados similares com as calibrações usando fotografias terrestres, foi o que apresentou melhor desempenho nas aerotriangulações realizadas, comprovando a importância da calibração ser realizada o mais próximo possível das condições de utilização da câmara. Essa condição foi observada nos experimentos realizados, apesar da calibração apresentar deficiência na quebra de correlação entre a distância focal e a coordenada  $Z_0$  da estação de exposição, o que acarretou baixa precisão na determinação desse parâmetro de orientação interior.

O método de calibração usando fotografias aéreas inclinadas apresentou resultados similares aos do método da calibração das câmaras convergentes. Entretanto, o primeiro método mostrou possuir forte rigidez na quebra de correlações entre os parâmetros de orientação interior e exterior.

A câmara Kodak foi considerada estável, no período de tempo decorrido entre as calibrações, pelos testes estatísticos que mediram o grau de similaridade dos parâmetros de orientação interior, ao nível de 90% de significância, determinados nas diferentes calibrações. A câmara Kodak também foi considerada estável para a realização de aerotriangulação de acordo com as precisões horizontais e verticais impostas nesta pesquisa, através de testes estatísticos que mediram o grau de similaridade, ao nível de significância de 90%, das exatidões espaciais obtidas nas aerotriangulações realizadas com diferentes parâmetros de orientação interior.

A câmara Sony foi considerada instável pelo mesmo teste estatístico realizado com a câmara Kodak por não possuir homogeneidade nos valores determinados para a distância focal nas diferentes calibrações. Entretanto os testes estatísticos que mediram o grau de similaridade das precisões e exatidões obtidas nas diferentes aerotriangulações, realizadas com diferentes parâmetros de orientação interior, a câmara foi considerada estável para a realização de aerotriangulação de acordo com as precisões horizontais e verticais impostas nesta pesquisa.

A câmara Sony não apresentou significativas alterações nos seus parâmetros de orientação interior devida a uma grande variação da temperatura existente entre a calibração e sua utilização na aerotriangulação.

Os métodos empregados, nesta pesquisa para verificar a estabilidade geométrica de câmaras de baixo custo, com base na verificação do grau de similaridade das precisões e exatidões obtidas numa aerotriangulação convencional, não garantem que a câmara será estável em outras aplicações fotogramétricas, como no caso de uma aerotriangulação com a fixação das posições da estação de exposição.

Nas pesquisas realizadas, o desempenho dos campos de calibração terrestre, quer plano ou tridimensional, na recuperação da geometria projetiva foram similares.

Devido aos problemas de correlações existentes entre os parâmetros de orientação interior e exterior e as dificuldades inerentes aos métodos conhecidos em eliminar totalmente o problema num ajustamento simultâneo, recomenda-se a pesquisa com métodos de calibração que determinem os parâmetros de orientação exterior das imagens no instante das tomadas.

Recomenda-se a realização de pesquisa para a verificação da estabilidade de câmaras de baixo custo para a realização de aerotriangulações não convencionais, ou naquelas onde os parâmetros de posição e ou rotação das imagens são determinadas no instante das tomadas das imagens.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTZ, J.; KREILING, W. **Photogrammetric Guide**, Ed. Wichmann, Karlsruhe, 1989.

ANDRADE, J.B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 2003.

BOTELHO, M.F.; CENTENO, J.A.S. Reconstrução tridimensional de edificações utilizando dados LASER scanner aerotransportados - 3D reconstruction of building using LAsER scanner data airborne. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 13, n. 1, p.107-126, jan-jun 2007.

Brown, D. C. Decentering Distortion and the Definitive Calibration of Metric Cameras. **American Society of Photogrammetry**, Convention, mar. 1965.

Brown, D. C. Decentering Distortion of Lenses. **Photogrammetric Engineering**, V 32, n 3, may. 1966.

CONRADY, A. E. Decentered lens System. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 79; 384-390.

T. A. CLARKE, T. A. e FRYER, J. G. The Development of Camera Calibration Methods and Models. **Photogrammetric Record**, v 16, n 91, p: 51-66 apr. 1998

CÔRTEZ, J.B.R. O uso de fotografias aéreas de pequeno formato digitalizadas em mapeamento topográfico planimétrico. Dissertação de mestrado. (Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1998.

CRONK, S.; FRASER, C.S.; HANLEY, H.B. Automated Metric Calibration of Colour Digital Cameras. **Photogrammetric Record**, v. 21, n. 116, p. 355-372, dez.2006.

DELARA, R.J.R; MITISHITA, E. A.; HABIB, A. Bundle adjustment of images from non-metric ccd camera using lidar data as control points. In: XX<sup>TH</sup> ISPRS CONGRESS, 2004, Istambul. **Proceedings**. CD-ROM.

DIGITAL PHOTOGRAPHY REVIEW. Disponível em: <<http://www.dpreview.com/reviews/kodakdcs14n/>>. Acesso em: 06/02/2008.

DISPERATI, A. A.; OLIVEIRA FILHO, P. C. Delineamento de copas de árvores, em fotografias aéreas de alta resolução, através de suas sombras periféricas. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 195-202, 2005.

FERREIRA JR, A.V.; NASCIMENTO, K.C. DO; FREITAS NETO, O. de, AMARAL, R.F. DO. Mapeamento da zona costeira do litoral sul do Rio grande do Norte com uso de fotografias aéreas de pequeno formato e modelo digital de terreno. **XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia 2005. In: Goiânia, 2009. CD-ROM.

FIERRO, J. A. S.; **Extração semi-automática de feições planas e cálculo de entidades pontuais a partir dos dados para apoio fotogramétrico**. 84 f. Dissertação de Mestrado (Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

FRASER, C. S., Digital camera self-calibration. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.52, n.4, p 149–159, 1997

GONÇALVES, G. A. **Detecção automática de alterações na cartografia cadastral com base em imagens de câmaras digitais**. 284 f. Tese de doutorado (Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

HABIB, A. F.; MORGAN, M. F. Small format digital cameras for mapping applications: Calibration and Stability Analysis. **Série em Ciências Geodésicas**, v. 3, Curitiba, 2003.

HABIB, A.; MORGAN, M. Stability analysis and geometric calibration of off-the-shelf digital cameras. **Photogrammetric engineering & remote sensing**, v.71, n. 6, p. 733–741. jun.2005.

HABIB, A.; PULLIVELLI, A.; MITISHITA, E.; GHANMA, M.; EUI-MYOUNG K. Stability Analysis Of Low-Cost Digital Cameras For Aerial Mapping Using Different Georeferencing Techniques. **The Photogrammetric Record**, v.21, n.113, p. 29-43, mar.2006.

HABIB, A.; EUI-MYOUNG K; CHANG-JAE K. New Methodologies for True Orthophoto Generation. **Photogrammetric engineering & Remote Sensing**, v. 73, n. 1, p. 25–36, jan.2007.

KERSTING, A. P. B. **Mapeamento de obstáculos sob a faixa de domínio de linhas de transmissão usando uma abordagem orientada a objeto, tecnologia lidar e câmara digital de pequeno formato**. 173 f. Dissertação de mestrado

(Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

LUGNANI, J.B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998.

MACHADO, A.M.L.; MITISHITA, E.; SANTOS JÚNIOR, R. L.; BARBOSA F. P. Verificação da estabilidade geométrica dos parâmetros de calibração de uma câmara digital de pequeno formato Sony-F717. **Série em Ciências Geodésicas - Novos desenvolvimentos em Ciências Geodésicas**. Curitiba, v. 3, 2003, p. 292-309.

MACHADO, A.M.L. **Extração automática de contornos e edificações utilizando imagem gerada por câmara digital de pequeno formato e dados lidar**. 213 f. Tese de doutorado (Programa de Pós Graduação em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciência da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006

MACHADO, A. M. L.; MITISHITA, E. A. Detecção automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmara digital de pequeno formato e dados LIDAR. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 12, n. 2, p.215-233, jul-dez, 2006.

MARCATO, JR.; MARQUES, A.P.S.; REINA, C.D.; KERPER, G. M.; ROCHA, F.S.; HASEGAWA, J. K.; DECANINI, M. M. S.; CHAVES, J. C. Atualização e geração de produtos cartográficos a partir de imagens obtidas com câmaras analógica e digital. In: XIV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO. **Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Natal: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2009. p.1803-1810.

MENDONÇA JR, M. G. **Reconstrução de edificações para geração de ortoimagens verdadeiras com emprego de Dados Lidar**. 250 f. Tese de doutorado (Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

MERCHANT, D. **Analytical Photogrammetry Theory and Practice Part I**. Ohio: The Ohio State University, Department of Geodetic Science, 1979.

MINISTÉRIO DO EXÉRCITO. Manual Técnico de Aerotriangulação, T34-304, 2ª ed., 1984.

MITISHITA, E.; MACHADO, A.; HABIB, A.; E GONÇALVES, G. 3D Monocular Restitution Applied to Small Format Digital Airphoto and Laser Scanner Data. In: XX<sup>TH</sup> ISPRS CONGRESS, 2004, Istambul. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. p. 70-

75. Também disponível em <<http://www.isprs.org/proceedings/XXXV/congress/comm3/papers/243.pdf>> Acesso em 25/11/2006.

MITISHITA, E., HABIB, A., CENTENO, J., MACHADO, A., LAY, J., e WONG, C. Photogrammetric and LIDAR data integration using the centroid of a rectangular roof as a control point. **The Photogrammetric Record**, v.23, n.121, p. 19-35, Mar.2008.

MITISHITA, E., MACHADO, A. M. L., SILVA, V. F., TREVIZAN, S. J., SIKORSKI, J., Desenvolvimento de técnica de mapeamento planimétrico cadastral de rodovias utilizando-se de monorrestituição, imagens digitais provenientes de câmera de vídeo e helicóptero. **Série em Ciências Geodésicas**. v. 3, Curitiba, 2003.

MITISHITA, E.; CÔRTEZ, J.; CENTENO, J.; MACHADO, A, M. Small-Format digital camera: a study into stability analysis of the interior orientation parameters through temperature variation, In: MMT09 2009 6TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MOBILE MAPPING TECHNOLOGY. **Proceedings**. Presidente Prudent: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2009. CD-ROM.

MOFFITT, F.H. **Photogrammetry**. 3rd ed. New York: Harper & Row, 1980.

OLIVAS, M. A. de A. **Calibração de Câmaras Fotogramétricas Aplicação dos Métodos: Câmaras Convergentes e Campos Mistos**. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciência da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1980.

ROTTENSTEINER, F.; BRIESE, C. Automatic generation of building models from lidar data and the integration of aerial images. In: PROCEEDINGS OF THE ISPRS WORKING GROUP III/3 WORKSHOP, 2003, Dresden. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. Também disponível em: <[http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/3W13/papers/Rottensteiner\\_ALSDD2003.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/3W13/papers/Rottensteiner_ALSDD2003.pdf)>. Acesso em: 08/07/2007.

RUY, R.S.; TOMMASELLI, A.M.G.; GALO, M.; HASEGAWA, J. K.; MENOSSI, R.C. Fototriangulação com parâmetros adicionais para câmaras digitais: uma avaliação experimental. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 14, n. 4 p. 571-587, out-dez, 2008.

SANTOS, A. F.; CARDOSO, L. G, Delimitação das áreas de preservação Permanente (Mata ciliar) da microbacia hidrográfica do Ribeirão Faxinal, Botucatu-SP. In: I SEMINÁRIO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO PARAÍBA DO SUL: O EUCALIPTO E O CICLO HIDROLÓGICO, 2007, Taubaté. **Anais do I Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o eucalipto e o Ciclo Hidrológico**. Taubaté: IPABHi, 2007. p. 231-235.

Também disponível em: < <http://www.agro.unitau.br/serhidro/anais.php>>. Acesso em: 14/03/2009.

TOMMASELLI, A. M. G., S., TELLES, S. S. S. A Mathematical model for camera calibration using straight lines, In: EUROCOW 2006 INTERNATIONAL CALIBRATION AND ORIENTATION WORKSHOP, 2006, Castelldefels. **Proceedings**. CD-ROM.

WACKROW, R.; CHANDLER, J. H.; BRYAN, P.; Geometric consistency and stability of consumer-grade digital cameras for accurate spatial measurement. . **The Photogrammetric Record**, v.22, n.118, p.121-134, jun.2006.

WOLF, D. **Elements of Photogrammetry with Aplications in GIS**. Third edition - The McGraw-Hill Companies, 2004.

RIEKE-ZAPP, D., TECKLENBURG, W., PEIPE, J., HASTEDT, H., HAIG, C., Evaluation of the geometric stability and the accuracy potential of digital cameras-Comparing mechanical stabilisation versus parameterisation. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.64, n.3, p. 248–258, 2009

# Anexo 1 - Tabela do Coeficiente de Correlação - FILLIBEN

Na Tabela 31 estão os valores tabelados para teste de FILLIBEN.

**TABELA 31 - COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO PARA O TESTE DE FILLIBEN.**

n	Nível de confiança													
	0.000	0.005	0.010	0.025	0.050	0.100	0.250	0.500	0.750	0.900	0.950	0.975	0.990	0.995
03	0.866	0.867	0.869	0.812	0.879	0.891	0.924	0.966	0.991	0.999	1.000	1.000	1.000	1.000
04	0.784	0.813	0.822	0.845	0.668	0.894	0.931	0.958	0.979	0.992	0.996	0.998	0.999	1.000
05	0.726	0.803	0.822	0.855	0.902	0.935	0.960	0.971	0.988	0.992	0.995	0.995	0.997	0.998
06	0.683	0.818	0.835	0.868	0.890	0.911	0.940	0.962	0.977	0.986	0.990	0.993	0.996	0.997
07	0.648	0.828	0.847	0.876	0.899	0.916	0.944	0.965	0.978	0.986	0.990	0.992	0.995	0.996
08	0.841	0.859	0.886	0.886	0.924	0.948	0.967	0.979	0.986	0.990	0.992	0.995	0.996	0.996
09	0.595	0.851	0.865	0.893	0.912	0.929	0.951	0.968	0.980	0.987	0.990	0.992	0.994	0.995
10	0.574	0.860	0.876	0.900	0.912	0.934	0.954	0.970	0.981	0.987	0.990	0.992	0.994	0.995
11	0.556	0.868	0.883	0.906	0.922	0.938	0.957	0.972	0.982	0.982	0.990	0.992	0.994	0.995
12	0.539	0.875	0.889	0.912	0.926	0.941	0.959	0.973	0.982	0.988	0.990	0.992	0.994	0.995
13	0.825	0.882	0.895	0.917	0.931	0.944	0.962	0.975	0.983	0.988	0.991	0.993	0.994	0.995
14	0.512	0.388	0.901	0.922	0.934	0.947	0.964	0.976	0.984	0.989	0.991	0.993	0.994	0.993
15	0.500	0.894	0.907	0.925	0.937	0.950	0.965	0.977	0.984	0.989	0.991	0.993	0.994	0.995
16	0.489	0.899	0.912	0.928	0.940	0.952	0.967	0.978	0.985	0.989	0.991	0.993	0.994	0.995
17	0.478	0.903	0.916	0.931	0.942	0.954	0.968	0.979	0.966	0.990	0.992	0.993	0.994	0.995
16	0.469	0.907	0.919	0.934	0.945	0.956	0.969	0.979	0.986	0.990	0.992	0.993	0.995	0.995
19	0.460	0.909	0.923	0.937	0.947	0.958	0.971	0.980	0.987	0.990	0.992	0.993	0.995	0.995
20	0.452	0.912	0.925	0.939	0.950	0.960	0.972	0.981	0.987	0.991	0.992	0.994	0.995	0.995
21	0.445	0.914	0.928	0.942	0.952	0.961	0.973	0.981	0.987	0.991	0.993	0.994	0.995	0.996
22	0.437	0.918	0.930	0.944	0.954	0.962	0.974	0.982	0.988	0.991	0.993	0.994	0.995	0.996
23	0.431	0.922	0.933	0.947	0.955	0.964	0.975	0.983	0.988	0.991	0.993	0.994	0.993	0.996
24	0.424	0.926	0.936	0.949	0.957	0.965	0.975	0.983	0.988	0.992	0.993	0.994	0.995	0.996
25	0.418	0.928	0.937	0.950	0.938	0.966	0.976	0.984	0.989	0.992	0.993	0.994	0.995	0.996
26	0.412	0.930	0.939	0.952	0.959	0.967	0.977	0.984	0.989	0.992	0.993	0.994	0.995	0.996
27	0.407	0.932	0.941	0.953	0.960	0.968	0.977	0.984	0.989	0.992	0.994	0.995	0.995	0.996
28	0.402	0.934	0.943	0.955	0.962	0.969	0.978	0.985	0.990	0.992	0.994	0.995	0.995	0.996
29	0.397	0.937	0.945	0.956	0.962	0.969	0.979	0.985	0.990	0.992	0.994	0.995	0.995	0.996
30	0.392	0.938	0.947	0.957	0.964	0.970	0.979	0.986	0.990	0.993	0.994	0.995	0.996	0.996
31	0.388	0.939	0.948	0.938	0.965	0.971	0.980	0.986	0.990	0.993	0.994	0.995	0.996	0.996
32	0.383	0.939	0.949	0.959	0.966	0.972	0.980	0.986	0.990	0.993	0.994	0.995	0.996	0.996
33	0.379	0.940	0.950	0.960	0.967	0.973	0.981	0.987	0.991	0.993	0.994	0.995	0.996	0.996
34	0.375	0.941	0.951	0.960	0.967	0.973	0.981	0.987	0.991	0.993	0.994	0.995	0.996	0.996
33	0.371	0.943	0.952	0.961	0.968	0.974	0.982	0.987	0.991	0.993	0.995	0.995	0.996	0.997
36	0.367	0.945	0.953	0.962	0.968	0.974	0.982	0.987	0.991	0.994	0.995	0.996	0.996	0.997
37	0.364	0.947	0.955	0.962	0.969	0.975	0.982	0.988	0.991	0.994	0.995	0.996	0.996	0.997
38	0.360	0.948	0.956	0.964	0.970	0.975	0.983	0.988	0.992	0.994	0.995	0.996	0.996	0.997
39	0.357	0.949	0.957	0.965	0.971	0.976	0.983	0.988	0.992	0.994	0.995	0.996	0.996	0.997
40	0.354	0.949	0.958	0.966	0.972	0.977	0.983	0.988	0.992	0.994	0.995	0.996	0.996	0.997
41	0.351	0.950	0.958	0.967	0.972	0.977	0.984	0.989	0.992	0.994	0.995	0.996	0.996	0.997



n	Nível de confiança													
	0.000	0.005	0.010	0.025	0.050	0.100	0.250	0.500	0.750	0.900	0.950	0.975	0.990	0.995
42	0.348	0.951	0.959	0.967	0.973	0.978	0.984	0.989	0.992	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997
43	0.345	0.953	0.959	0.967	0.973	0.978	0.984	0.989	0.992	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997
44	0.342	0.954	0.960	0.968	0.973	0.978	0.984	0.989	0.992	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997
45	0.339	0.955	0.961	0.969	0.974	0.978	0.985	0.989	0.993	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997
46	0.336	0.956	0.962	0.969	0.974	0.979	0.985	0.990	0.993	0.995	0.995	0.996	0.997	0.997
47	0.334	0.956	0.963	0.970	0.974	0.979	0.985	0.990	0.993	0.995	0.995	0.996	0.997	0.997
48	0.331	0.957	0.963	0.970	0.975	0.980	0.985	0.990	0.993	0.995	0.996	0.996	0.997	0.997
69	0.329	0.957	0.964	0.971	0.975	0.980	0.986	0.990	0.993	0.995	0.996	0.996	0.997	0.997
50	0.326	0.959	0.965	0.972	0.977	0.981	0.986	0.990	0.993	0.995	0.996	0.996	0.997	0.997
55	0.315	0.962	0.967	0.974	0.978	0.982	0.987	0.991	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997	0.997
60	0.305	0.965	0.970	0.976	0.980	0.983	0.988	0.991	0.994	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998
65	0.296	0.967	0.972	0.977	0.981	0.984	0.989	0.992	0.994	0.996	0.996	0.997	0.997	0.998
70	0.288	0.969	0.974	0.978	0.982	0.985	0.989	0.993	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
75	0.281	0.971	0.975	0.979	0.983	0.986	0.990	0.993	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
80	0.214	0.973	0.976	0.980	0.984	0.987	0.991	0.933	0.995	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998
85	0.268	0.974	0.977	0.981	0.985	0.987	0.991	0.994	0.995	0.997	0.997	0.997	0.998	0.998
90	0.263	0.976	0.978	0.962	0.985	0.988	0.991	0.994	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998	0.998
95	0.257	0.977	0.979	0.983	0.986	0.989	0.992	0.994	0.996	0.997	0.997	0.998	0.998	0.998
100	0.252	0.979	0.981	0.984	0.987	0.989	0.992	0.994	0.996	0.997	0.998	0.998	0.998	0.998

Onde:

$$p(z \leq q_j) = \int_{-\infty}^{q_j} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$$

$$p_j = \frac{j-0,5}{n}$$

O valor 0,5 é dito correção de continuidade, pelo fato de se aproximar de uma distribuição discreta por uma continua;

$q_j$  é o quantil observado;

$j$  refere-se a cada observação ordenada ( $j=1, \dots, n$ );

$p(j)$  é a expressão da função de distribuição acumulada.

O valor do coeficiente de correlação de Filliben é obtido pela equação (18).

$$r_c = \frac{\left[ n \sum_{i=1}^n (X \cdot Z) - \sum_{i=1}^n X \cdot \sum_{i=1}^n Z \right]}{\sqrt{\left[ n \left( \sum_{i=1}^n X^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^n X \right)^2 \right] \cdot \left[ n \left( \sum_{i=1}^n Z^2 \right) - \left( \sum_{i=1}^n Z \right)^2 \right]}} \quad (18)$$

## Apêndice 1 - Numeração e Coordenadas dos Alvos do Campo de Calibração Plano Parede

A Tabela 32 mostra a numeração dos alvos pré-sinalizados com suas respectivas coordenadas do campo de calibração Parede.

Tabela 32 - Numeração e coordenadas cartesianas dos alvos do campo de calibração parede

Numeração dos Alvos	Coordenadas Cartesianas(m)		
	X	Y	Z
11	0,014	6,327	0,007
12	1,017	6,329	0,005
13	2,015	6,330	0,003
14	3,013	6,329	0,002
15	4,018	6,330	0,002
16	5,011	6,329	0,001
17	6,008	6,334	-0,002
18	7,008	6,336	-0,003
19	8,002	6,332	-0,005
21	-0,019	4,750	0,001
22	0,990	4,744	-0,001
23	1,997	4,745	-0,004
24	2,995	4,744	-0,002
25	3,999	4,745	-0,004
26	5,002	4,747	-0,002
27	6,000	4,748	-0,005
28	7,003	4,749	-0,007
29	7,995	4,751	-0,007
31	-0,009	3,167	-0,001
32	0,999	3,165	-0,002
33	1,999	3,165	-0,005
34	3,004	3,167	-0,005
35	4,003	3,165	-0,005
36	5,004	3,161	-0,007
37	6,001	3,164	-0,006
38	6,999	3,163	-0,007
39	7,997	3,165	-0,005
41	0,005	1,589	-0,001
42	1,007	1,588	-0,002
43	2,015	1,590	-0,001

Numeração dos Alvos	Coordenadas Cartesianas(m)		
	X	Y	Z
44	3,000	1,590	-0,002
51	0,000	0,000	0,000
52	0,999	0,001	0,000
53	2,002	-0,003	-0,001
54	3,006	0,000	0,000
55	3,893	0,810	-0,004
56	4,642	2,299	-0,004
57	4,959	1,765	-0,003
58	4,646	0,520	-0,005
59	5,823	-0,127	0,000
60	6,236	2,157	-0,004
61	6,578	1,739	-0,003
62	6,503	0,386	-0,005
63	7,310	0,665	-0,005
64	6,873	2,549	-0,005
65	3,895	2,547	-0,005
66	5,495	2,423	-0,005
67	4,086	1,892	-0,004
68	5,518	1,902	-0,003
69	7,136	1,785	-0,003
70	4,474	1,410	-0,003
71	5,194	1,244	-0,002
72	5,975	1,526	-0,003
73	5,869	1,030	-0,003
74	6,498	1,177	-0,005
75	7,158	1,155	-0,003
76	5,514	0,660	-0,003
77	4,073	0,028	-0,004
78	5,129	0,005	-0,003
79	6,889	0,024	-0,003

Fonte: Laboratório de Fotogrametria do CPGCG.

As coordenadas do campo de calibração plano Parede são coordenadas locais, definidas a partir de um sistema cartesiano tridimensional, com origem no alvo inferior esquerdo (alvo de número 51). Conforme mostra a Figura 31, o eixo X está no sentido horizontal orientado para a direita, o eixo Y está no sentido vertical orientado para cima e o eixo Z é ortogonal aos eixos X e Y saindo da parede.

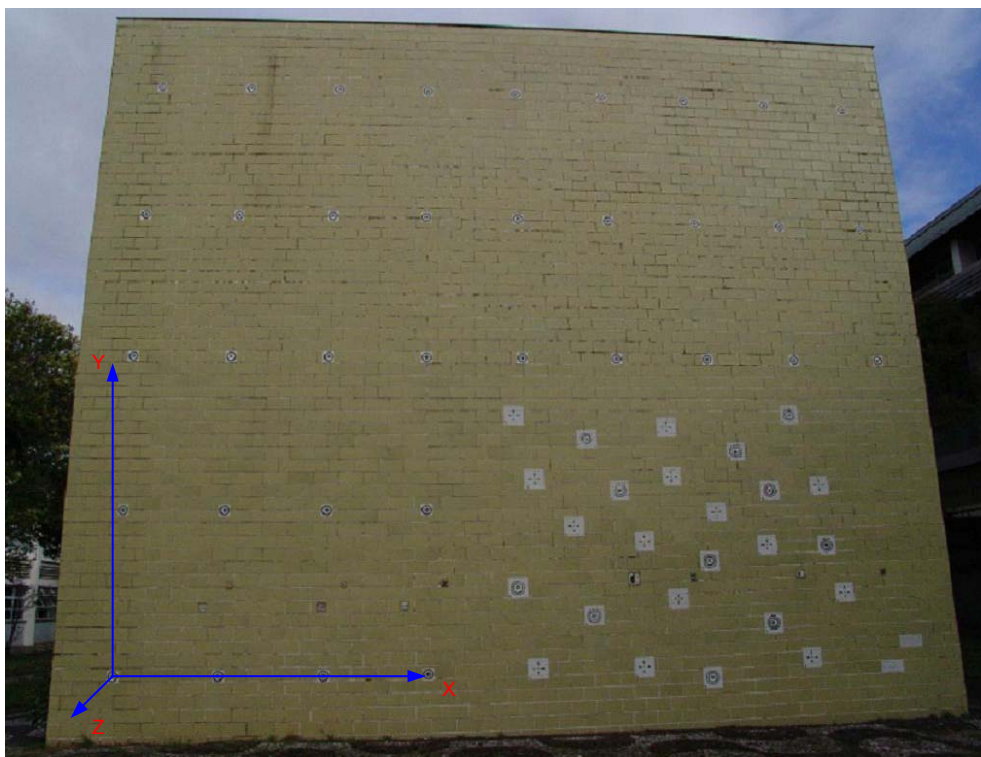


FIGURA 31 - ORIENTAÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS DO CAMPO DE CALIBRAÇÃO PAREDE  
FONTE: O Autor.

## Apêndice 2 - Coordenadas dos Alvos Pré-Sinalizados no Campo de Calibração Bacacheri

A Tabela 33 apresenta a numeração dos alvos pré-sinalizados, com suas coordenadas no sistema de referência SIRGAS 2000 e sistema de projeção cartográfica UTM no fuso 22 (MC 51° W) e nas duas técnicas de posicionamento.

**Tabela 33 - Coordenadas dos alvos no Campo de Calibração Bacacheri**

Ponto	RTK				Estático Rápido			
	Coordenadas UTM fuso 22 (SIRGAS 2000)				Coordenadas UTM fuso 22 (SIRGAS 2000)			
	e (m)	N (m)	h (m)	RMS	E (m)	N(m)	h(m)	RMS
01	677755,459	7188335,709	930,868	0,021				
02	677585,066	7188445,692	923,608	0,022				
03	677523,808	7188540,114	917,599	0,021	677523,810	7188540,126	917,5959	0,008
04	677447,061	7188629,357	922,362	0,020				
05	677376,997	7188737,540	923,470	0,021	677377,001	7188737,547	923,4439	0,007
06	677600,450	7188292,930	917,310	0,022				
08	677422,060	7188449,340	913,028	0,020				
09	677209,500	7188777,100	919,517	0,024				
10	677491,780	7188130,620	907,811	0,020	677491,757	7188130,63	907,7921	0,005
11	677339,000	7188380,080	911,067	0,020	677339,020	7188380,07	911,0791	0,005
12	677246,640	7188648,710	917,278	0,021				
13	677133,523	7188561,904	918,964	0,026				
14	677063,350	7188669,920	920,043	0,026				
15	677304,270	7188180,800	913,486	0,021				
16	677195,650	7188380,240	920,695	0,025				
18	677078,280	7188479,190	921,120	0,021				
19	676971,020	7188604,440	926,127	0,021	676971,027	7188604,419	926,136	0,009
20	676917,430	7188675,280	928,118	0,023				
21	677211,350	7188072,750	915,829	0,024				
22	677164,370	7188188,490	918,889	0,017				
23	677107,170	7188065,070	921,767	0,022				
24	677048,810	7188152,120	924,676	0,027				
25	676928,360	7188437,330	926,642	0,026				
26	677028,140	7188036,830	923,293	0,021				
27	676917,430	7188044,520	925,724	0,024	676917,409	7188044,542	925,7205	0,008
28	676819,960	7188253,600	916,690	0,023				
29	676802,420	7188141,630	915,733	0,018				
30	676688,420	7187910,310	911,143	0,022				
31	676678,940	7188096,900	911,963	0,023				

Ponto	RTK				Estático Rápido			
	Coordenadas UTM fuso 22 (SIRGAS 2000)				Coordenadas UTM fuso 22 (SIRGAS 2000)			
	e (m)	N (m)	h (m)	RMS	E (m)	N(m)	h(m)	RMS
32	676688,370	7188163,190	909,934	0,028	676688,386	7188163,216	909,9575	0,014
33	676649,470	7188326,760	911,567	0,028				
34	676595,920	7188059,970	909,258	0,019				
35	676526,090	7188201,200	905,156	0,023	676526,074	7188201,196	905,1405	0,008
37	676536,450	7188334,480	909,591	0,025				
38	676502,872	7188064,542	905,218	0,025				
39	676571,790	7187921,390	906,685	0,023	676571,814	7187921,432	906,6159	0,006
41	676398,790	7188194,670	904,245	0,023	676398,774	7188194,662	904,2268	0,011
42	676409,940	7188318,540	905,454	0,028				
43	676422,130	7188424,510	905,939	0,023				
44	676489,720	7187786,500	905,196	0,022	676489,730	7187786,49	905,1729	0,007
45	676443,790	7187937,230	903,255	0,025				
46	676383,700	7188078,740	902,626	0,023	676383,699	7188078,733	902,6577	0,0094
47	676261,870	7188357,410	907,838	0,029				
48	676369,970	7187938,110	901,707	0,020				
49	676317,150	7188073,750	905,412	0,023				
50	676217,460	7188206,570	909,709	0,020				
51	676140,300	7188486,550	909,376	0,022	676140,312	7188486,545	909,3859	0,0066
52	676356,670	7187810,440	901,208	0,027				
53	676286,830	7187951,460	903,631	0,023	676286,861	7187951,449	903,6301	0,008
54	676157,000	7188284,530	910,782	0,021				
55	676068,950	7188399,410	911,919	0,023				
58	676251,760	7187952,100	905,328	0,019				
59	676221,260	7187977,290	906,522	0,023				
60	676156,050	7188066,430	909,690	0,024				
61	676026,310	7188235,800	915,098	0,018				
62	675970,060	7188311,210	917,238	0,023				
63	675954,320	7188331,440	917,809	0,026				
64	676116,440	7187837,220	906,938	0,025				
65	676071,860	7187984,390	913,227	0,029				
66	676111,990	7187775,650	903,120	0,028				
67	676090,110	7187726,370	903,512	0,023	676090,104	7187726,345	903,5474	0,009
68	675989,930	7187748,880	910,074	0,020				
70	675905,330	7187879,520	922,017	0,027				
71	675827,740	7188015,060	921,833	0,027				
72	675967,970	7188098,450	917,036	0,019				
73	675920,480	7188162,710	918,476	0,029				
74	675842,660	7188250,400	922,153	0,026	675842,666	7188250,376	922,1791	0,008
75	677095,320	7187923,680	917,723	0,020				
76	676939,080	7187944,570	923,891	0,024				
77	676686,610	7187769,120	914,223	0,018				
78	676648,430	7187767,510	912,719	0,020				

Ponto	RTK				Estático Rápido			
	Coordenadas UTM fuso 22 (SIRGAS 2000)				Coordenadas UTM fuso 22 (SIRGAS 2000)			
	e (m)	N (m)	h (m)	RMS	E (m)	N(m)	h(m)	RMS
79	677864,710	7188186,380	919,093	0,024	677864,698	7188186,409	919,0706	0,007
82	677607,510	7188108,800	913,332	0,022				
83	677436,560	7188123,880	908,117	0,021				
84	677471,470	7187982,040	907,079	0,018				
85	676355,060	7188482,140	905,939	0,027				
86	676261,710	7188482,530	905,852	0,029				
87	675636,290	7188188,290	926,509	0,024				
88	675767,040	7187851,340	916,433	0,029				
89	675657,450	7187867,750	911,618	0,029				
90	675635,700	7187878,430	912,033	0,027				
91	675553,700	7187888,640	908,329	0,021	675553,679	7187888,620	908,3424	0,019
92	675600,100	7188010,120	916,191	0,021				
93	675533,650	7188081,110	915,759	0,030				
94	675476,580	7188115,320	915,536	0,020	675476,569	7188115,325	915,5483	0,008
95	675459,390	7188083,150	911,873	0,026	675459,383	7188083,140	911,9008	0,008
96	675408,840	7187972,400	907,803	0,021				
97	675440,170	7187974,040	908,046	0,031				
98	675377,620	7187861,100	907,737	0,019				
99	677002,720	7188472,980	923,513	0,023				
100	676741,440	7188215,590	911,861	0,026				
101	677230,960	7188225,990	916,615	0,021				
102	676289,150	7187732,480	901,240	0,018				
103	676854,440	7187762,500	925,317	0,023				
104	677011,098	7187818,721	920,215	0,026				
105	677128,189	7187875,342	916,212	0,025	677128,137	7187875,340	916,2071	0,008
106	676289,148	7187732,477	901,240	0,022				
107	676854,439	7187762,498	925,317	0,028				
108	677011,095	7187818,722	920,215	0,028				
109	677128,188	7187875,343	916,212	0,026				

FONTE: O Autor.

As coordenadas dos alvos pré-sinalizados de número 07, 17, 36, 40, 56, 57, 69, 80 e 81 não estão no quadro acima pois esses alvos não apareceram nas fotografias utilizadas para a realização das aerotriangulações, ou apareceram em somente uma delas.

### Apêndice 3 - Procedimento Para a Tomada das Fotografias Com Temperatura de 3°C

Antes da tomadas das fotografias, a câmara Sony foi colocada no interior de um freezer por 24 horas. Para retirar a umidade do ar do interior da câmara, a mesma foi inserida em um saco plástico contendo três quilos de sílica gel. O saco foi fechado hermeticamente com o auxílio de uma bomba de vácuo. Para que a sílica absorvesse a umidade, este procedimento foi realizado 48 horas antes da câmara ser introduzida no freezer.

Para minimizar a troca de calor entre a câmara e o meio ambiente, a mesma foi transportada até o campo de calibração envolta em gelo no interior de uma bolsa térmica. Durante o processo de tomada das fotografias, a câmara ficou dentro de uma caixa de poliestireno, revestida por placas térmicas de gel previamente congeladas. No interior dessa caixa foi colocado um termômetro com transmissão de dados via *wireless*, para o controle da temperatura. Durante todo o processo o operador da câmara usou luvas para diminuir a troca de calor de seu corpo com a câmara. Na parte frontal da caixa de isopropileno, foi aberto um orifício de aproximadamente 10x10 cm para a tomada das fotografias.

Entre uma estação de exposição e outra, o orifício frontal era fechado e, em aproximadamente 18 minutos a temperatura no interior da caixa estabilizava em 3°C. Aguardava-se mais 45 minutos para o equilíbrio das temperatura e iniciava-se outra sessão de tomada de fotografias.

#### Apêndice 4 - Teste de Normalidade Para os Parâmetros Recuperados da Geometria Projetiva da Câmara KODAK DCS Pro 14n

O Teste de normalidade foi realizado pela comparação entre coeficiente calculado conforme equação (18) e o coeficiente tabelado (Anexo 01). Se o coeficiente tabelado for maior que o calculado, a hipótese nula é aceita, ou seja, a amostra veio de uma distribuição normal.

Na Tabela 34, são apresentados os valores parciais obtidos para o cálculo do coeficiente de correlação do teste de normalidade de Filliben para a verificação da normalidade das amostras inerentes à distância focal da câmara Kodak.

Tabela 34 - Valores parciais para o coeficiente de correlação de Filliben para a distância focal

Distância Focal						
Ordem	X	P(acu)	Z	X*Z	X <sup>2</sup>	Z <sup>2</sup>
1	35,936	0,083	-1,376	-49,464	1291,403	1,895
2	35,942	0,250	-0,665	-23,910	1291,849	0,443
3	35,957	0,417	-0,200	-07,176	1292,884	0,040
4	35,961	0,583	0,200	07,177	1293,179	0,040
5	35,975	0,750	0,665	23,932	1294,193	0,443
6	35,987	0,917	1,376	49,534	1295,064	1,895
Σ	215,758	3,000	0,000	0,093	7758,573	4,754

FONTE: O Autor.

Calculando o coeficiente de correlação pela utilização da equação (18), obteve-se o valor do coeficiente de 0,988. O valor do coeficiente tabelado foi de 0,835. Esse valor foi obtido na Tabela 31 para o nível de confiança de 10% e 6 graus de liberdade.

Como o coeficiente de correlação tabelado ( $r_{tab} = 0,835$ ) foi menor que o coeficiente de correlação calculado, significa que a normalidade da amostra foi aceita na primeira etapa do teste.

A segunda etapa desse teste é a confecção do gráfico denominado de QQplot. O gráfico QQplot da distância para a análise da normalidade das amostras das distâncias focais da câmara Kodak está na Figura 32.



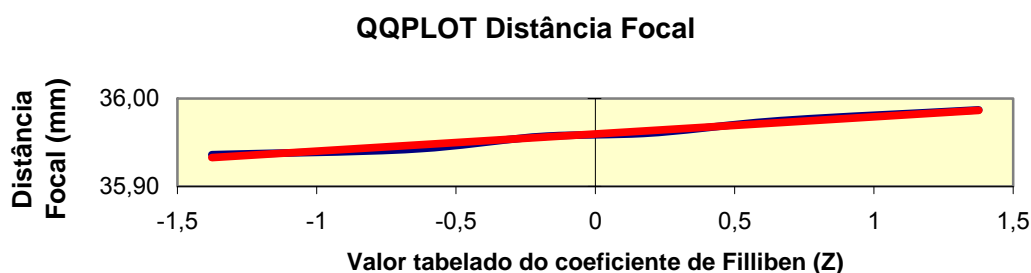


FIGURA 32 - GRÁFICO DA CURVA QQPLOT PARA AS DISTÂNCIAS FOCALIS - CÂMARA KODAK  
FONTE: O Autor.

Verifica-se que o gráfico acima é praticamente uma reta, portanto, a amostra passou na segunda etapa do teste. Isso significa que segundo o teste de Filliben, a amostra possui uma distribuição normal.

Na Tabela 35, estão os valores parciais obtidos para o cálculo do coeficiente de correlação do teste de normalidade de Filliben para a verificação da normalidade das amostras inerentes ao afastamento do ponto principal no eixo x da câmara Kodak.

Tabela 35 - Valores parciais para o coeficiente de correlação de Filliben para o afastamento do ponto principal no eixo x

Afastamento do ponto principal no eixo "X"						
Ordem	X	pacu	Z	X*Z	X <sup>2</sup>	Z <sup>2</sup>
1	0,031	0,083	-1,376	-00,043	0,001	1,895
2	0,034	0,250	-0,665	-00,023	0,001	0,443
3	0,052	0,417	-0,200	-00,010	0,003	0,040
4	0,081	0,583	0,200	00,016	0,007	0,040
5	0,125	0,750	0,665	00,083	0,016	0,443
6	0,126	0,917	1,376	00,174	0,016	1,895
Σ	0,450	3,000	0,000	0,198	0,043	4,754

FONTE: O Autor.

Calculando o coeficiente de correlação pela utilização da equação (18), obteve-se o valor do coeficiente de 0,939. O valor do coeficiente tabelado foi de 0,835. Esse valor foi obtido na Tabela 31 para o nível de confiança de 10% e 6 graus de liberdade.

Como o coeficiente de correlação tabelado ( $r_{tab} = 0,835$ ) foi menor que o coeficiente de correlação calculado ( $r_c = 0,939$ ), significa que a normalidade da amostra foi aceita na primeira etapa do teste.

A segunda etapa desse teste, é a confecção do gráfico denominado de QQplot. O gráfico QQplot da distância para a análise da normalidade das amostras das distâncias focais da câmara Kodak, está na Figura 33.

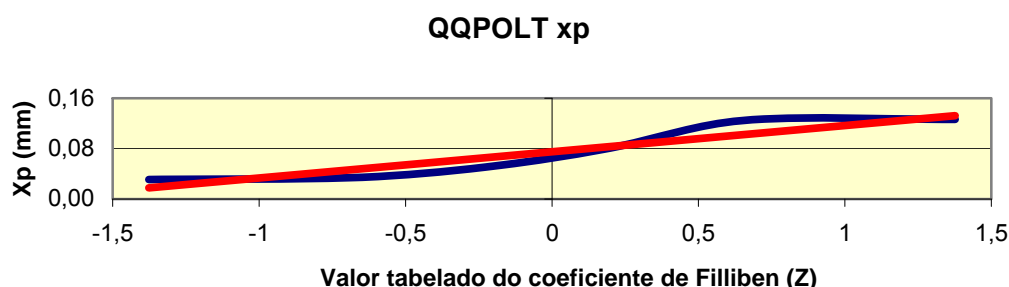


FIGURA 33 - GRÁFICO DA CURVA QQPLOT PARA AS DISTÂNCIAS FOCALIS - CÂMARA SONY

FONTE: O Autor.

Verifica-se que o gráfico acima é praticamente uma reta, portanto, a amostra passou na segunda etapa do teste. Isso significa que, segundo o teste de Filliben, a amostra possui uma distribuição normal.

Na Tabela 36, estão os valores parciais obtidos para o cálculo do coeficiente de correlação do teste de normalidade de Filliben para a verificação da normalidade das amostras inerentes ao afastamento do ponto principal no eixo "Y" da câmara Kodak.

Tabela 36 - Valores parciais para o coeficiente de correlação de Filliben para o afastamento do ponto principal no eixo "Y"

Afastamento do ponto principal no eixo "Y"						
Ordem	X	pacu	Z	X*Z	X <sup>2</sup>	Z <sup>2</sup>
1	0,029	0,083	-1,376	-00,040	0,001	1,895
2	0,100	0,250	-0,665	-00,066	0,010	0,443
3	0,102	0,417	-0,200	-00,020	0,010	0,040
4	0,131	0,583	0,200	00,026	0,017	0,040
5	0,139	0,750	0,665	00,092	0,019	0,443
6	0,300	0,917	1,376	00,412	0,090	1,895
Σ	0,800	3,000	0,000	0,404	0,147	4,754

FONTE: O Autor.

Calculando o coeficiente de correlação pela utilização da equação (18), obteve-se o valor do coeficiente de 0,919. O valor do coeficiente tabela foi de 0,835. Esse valor foi obtido na Tabela 31 para o nível de confiança de 10% e 6 graus de liberdade.

Como o coeficiente de correlação tabelado ( $r_{tab} = 0,835$ ) foi menor que o coeficiente de correlação calculado ( $r_c = 0,919$ ), significa que a normalidade da amostra foi aceita na primeira etapa do teste.

A segunda etapa desse teste é a confecção do gráfico denominado de QQplot. O gráfico QQplot da distância para a análise da normalidade das amostras das distâncias focais da câmara Kodak está na Figura 34.

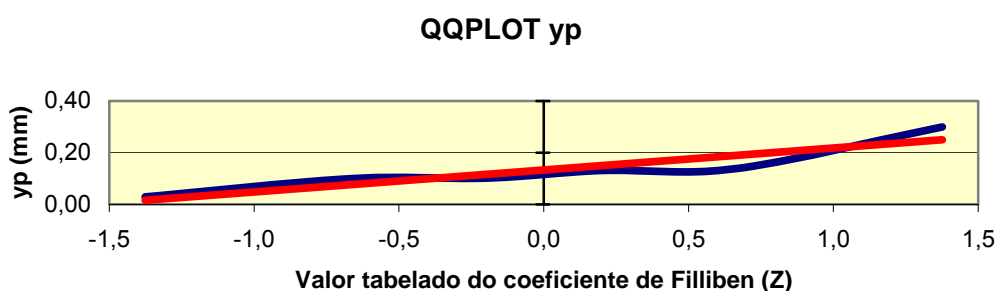


Figura 34- Gráfico da curva QQPLOT para as distâncias focais - Câmara Kodak  
 FONTE: O Autor.

Verifica-se que o gráfico acima é praticamente uma reta, portanto, a amostra passou na segunda etapa do teste. Isso significa que segundo o teste de Filliben, a amostra possui uma distribuição normal.

## Apêndice 5 - Precisão Altimétrica Esperada Para as Aerotriangulações- Câmara Kodak.

O cálculo da precisão altimétrica esperada para as aerotriangulações realizadas com a câmara Kodak foi realizado considerando a altitude de voo como sendo a média dos  $Z_0$ , a base fotogramétrica como a média das bases e a altitude do terreno como a média das altitudes dos alvos pré-sinalizados. Obteve-se  $Z_0 = 1921,817$  m,  $B = 375,547$  m e a altitude média =  $915,513$  m. Adotando a precisão de medida da paralaxe igual  $1 \text{ pixel}$  e aplicando a equação 08, tem-se:

$$dz = \pm \frac{H^2}{B \cdot f} d_{px} \therefore dz = \pm \frac{(1921,817 - 919,513)^2}{375,547 \cdot 0,035935} \cdot 7,9 \cdot 10^{-6} \therefore dz = \pm 0,588m$$

Apêndice 6 - Discrepâncias Obtidas Entre as Coordenadas Oriundas das Diversas Aerotriangulações Com as Determinadas por Levantamento Geodésico (GPS) - Câmara Kodak

Tabela 37 - Cálculo das discrepâncias entre as coordenadas dos pontos de verificação obtidas com levantamento geodésico e as determinadas pela aerotriangulação - Câmara Kodak

Discrepâncias entre as coordenadas dos pontos de verificação obtidas com GPS e aerotriangulação															
P	CCTPP - 2006			CCTPP - 2007			CCTPP - 2009			CCTTG - 2009			CCTB - 2009		
	$\Delta N^*$	$\Delta E^*$	$\Delta h^*$	$\Delta N^*$	$\Delta E^*$	$\Delta h^*$	$\Delta N^*$	$\Delta E^*$	$\Delta h^*$	$\Delta N^*$	$\Delta E^*$	$\Delta h^*$	$\Delta N^*$	$\Delta E^*$	$\Delta h^*$
01	0,025	-0,179	0,194	0,200	-0,162	-0,369	0,192	-0,181	-0,402	0,147	-0,068	-0,451	0,021	-0,092	-0,125
02	0,043	-0,060	-0,302	0,070	-0,121	-0,189	0,039	-0,160	-0,298	0,033	0,007	-0,469	-0,096	-0,066	-0,270
10	0,159	-0,216	0,686	0,141	-0,157	-0,424	0,149	-0,157	-0,196	0,236	-0,103	-0,527	0,126	-0,184	-0,057
11	0,125	-0,095	1,015	0,159	-0,099	-0,583	0,151	-0,105	-0,438	0,223	-0,063	-0,292	0,039	-0,087	-0,046
12	0,129	-0,184	0,484	0,187	-0,077	-0,360	0,191	-0,071	-0,023	0,217	-0,046	-0,524	0,119	-0,163	-0,009
13	-0,176	-0,178	0,458	-0,185	-0,266	-0,159	-0,194	-0,274	0,089	-0,084	-0,243	-0,508	-0,263	-0,160	0,048
14	0,102	-0,049	0,087	0,155	-0,136	-0,747	0,145	-0,145	-0,639	0,156	-0,083	-0,948	0,016	-0,055	-0,291
17	-0,067	0,023	1,045	-0,079	0,145	0,224	-0,047	0,127	0,444	-0,006	0,338	-0,734	0,136	-0,021	0,609
19	0,203	0,024	-0,019	0,164	-0,142	0,277	0,154	-0,146	0,468	0,257	-0,161	-0,294	0,156	0,011	-0,127
21	0,172	0,037	-1,096	0,146	-0,056	-0,152	0,179	-0,043	0,041	0,184	-0,040	-0,228	0,150	-0,094	-0,457
22	0,180	0,217	-1,239	0,229	0,017	0,246	0,245	0,025	0,405	0,307	0,021	0,132	0,233	0,079	-0,414
23	0,325	0,238	-1,474	0,240	0,007	0,891	0,237	0,006	1,137	0,377	-0,016	0,369	0,265	0,092	0,011
25	0,001	0,074	0,899	-0,086	-0,087	-0,293	-0,065	-0,080	-0,363	-0,063	0,133	0,445	0,178	-0,020	0,064
31	-0,101	-0,147	0,087	-0,036	0,045	-0,146	-0,016	0,036	-0,175	-0,065	0,046	0,073	0,063	0,034	0,115
32	-0,055	-0,086	0,296	-0,021	0,035	0,498	0,014	0,032	0,511	-0,090	-0,004	0,449	0,086	0,008	0,420
34	-0,126	-0,098	0,571	-0,228	-0,116	1,016	-0,236	-0,160	1,070	-0,221	-0,115	1,126	-0,069	-0,075	0,314
37	0,018	-0,054	-1,241	-0,098	0,053	-0,783	-0,005	0,012	-1,212	-0,282	0,282	0,547	0,172	0,115	-0,528
50	0,162	0,158	-0,993	0,204	-0,184	0,718	0,184	-0,199	0,885	0,352	-0,182	0,225	0,154	0,053	-0,490
51	-0,018	0,097	-0,310	0,190	-0,117	0,833	0,201	-0,110	0,963	0,200	-0,184	0,423	0,193	0,111	-0,236
55	-0,204	-0,245	-0,261	-0,015	-0,176	-0,344	-0,013	-0,218	-0,445	-0,127	-0,083	-0,577	-0,179	-0,183	-0,252
56	0,012	-0,146	-0,014	0,093	-0,183	-0,146	0,076	-0,229	-0,263	0,019	-0,044	-0,248	-0,079	-0,145	-0,159
57	-0,086	-0,221	-0,046	-0,061	-0,113	-0,456	-0,034	-0,124	-0,245	-0,046	0,006	-0,995	-0,006	-0,178	-0,351
58	-0,207	-0,045	-1,050	-0,167	0,031	0,353	-0,183	-0,040	0,000	-0,189	0,372	1,493	-0,233	-0,011	-0,430
63	-0,016	-0,157	1,076	0,035	-0,043	0,241	0,031	-0,023	0,133	0,006	-0,176	0,818	0,059	0,041	0,117
64	-0,019	-0,105	0,088	0,050	-0,005	-0,060	0,049	0,001	-0,046	0,026	-0,076	-0,110	0,091	0,085	-0,369
65	-0,201	-0,226	0,448	0,005	-0,213	0,250	0,018	-0,199	0,170	-0,047	-0,370	0,414	-0,085	-0,030	-0,127
67	0,127	-0,083	-0,054	0,260	-0,216	0,262	0,222	-0,202	0,272	0,234	-0,207	-0,218	0,035	0,028	-0,205
68	-0,082	-0,030	-1,080	0,142	-0,210	0,552	0,130	-0,225	0,652	0,031	-0,109	-0,597	-0,156	-0,031	-0,342

Discrepâncias entre as coordenadas dos pontos de verificação obtidas com GPS e aerotriangulação

P	CCTPP - 2006			CCTPP - 2007			CCTPP - 2009			CCTTG - 2009			CCTB - 2009		
	$\Delta N^*$	$\Delta E^*$	$\Delta h^*$	$\Delta N^*$	$\Delta E^*$	$\Delta h^*$	$\Delta N^*$	$\Delta E^*$	$\Delta h^*$	$\Delta N^*$	$\Delta E^*$	$\Delta h^*$	$\Delta N^*$	$\Delta E^*$	$\Delta h^*$
69	0,174	0,119	0,492	0,243	-0,087	1,061	0,175	-0,055	0,954	0,237	-0,135	0,652	-0,022	0,169	0,334
70	0,071	0,424	-0,190	0,173	0,248	-0,293	0,164	0,258	-0,360	0,220	0,269	-0,025	-0,014	0,406	-0,857
71	-0,054	-0,175	-1,127	-0,081	-0,148	-0,811	-0,016	-0,153	-0,634	-0,088	0,001	-0,805	0,008	-0,161	-0,553
$\bar{X}$	0,020	-0,044	-0,083	0,065	-0,082	0,036	0,069	-0,090	0,079	0,069	-0,033	-0,044	0,035	-0,017	-0,150
$\sigma$	0,136	0,157	0,752	0,140	0,114	0,530	0,130	0,117	0,567	0,176	0,168	0,609	0,134	0,126	0,316
M	0,325	0,424	1,076	0,260	0,248	1,061	0,245	0,258	1,137	0,377	0,372	1,493	0,265	0,406	0,609
m	-0,207	-0,245	-1,474	-0,228	-0,266	-0,811	-0,236	-0,274	-1,212	-0,282	-0,370	-0,995	-0,263	-0,184	-0,857

Onde:

P - Número do ponto de verificação;

\* - Valores em metros;

$\bar{X}$  - Média em metros;

$\sigma$  - Desvio padrão em metros;

M - Máxima discrepância observada em metros;

m - Mínima discrepância observada em metros.

## Apêndice 7 - Cálculo da Estatística do Teste "t" Para a Hipótese Nula $H_0 : \mu \leq 0,225$

### Para os Erros Planimétricos e Altimétricos - Câmara Kodak

Com base na média e desvio padrão da amostra, foi calculada a média estimada da população para os erros planimétricos e altimétricos. Esses erros foram obtidos pela diferença entre as coordenadas dos pontos de verificação obtidas com GPS e as coordenadas dos pontos de verificação calculadas nas diversas aerotriangulações realizadas com a câmara Kodak.

#### Para a aerotriangulação CCTPP - 2006 - Planimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq 0,188 + 1,309 \cdot \frac{0,093}{\sqrt{31}} \therefore \mu \leq 0,210\text{m}$$

#### Para a aerotriangulação CCTPP - 2007 - Planimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq 0,192 + 1,309 \cdot \frac{0,078}{\sqrt{31}} \therefore \mu \leq 0,210\text{m}$$

#### Para a aerotriangulação CCTPP - 2009 - Planimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq 0,188 + 1,309 \cdot \frac{0,086}{\sqrt{31}} \therefore \mu \leq 0,208\text{m}$$

#### Para a aerotriangulação CCTTG - 2009 - Planimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq 0,223 + 1,309 \cdot \frac{0,117}{\sqrt{31}} \therefore \mu \leq 0,251\text{m}$$

#### Para a aerotriangulação CCTAB - 2009 - Planimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq 0,167 + 1,309 \cdot \frac{0,081}{\sqrt{31}} \therefore \mu \leq 0,186\text{m}$$

#### Para a aerotriangulação CCTPP - 2006 - Altimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq -0,083 + 1,309 \cdot \frac{0,752}{\sqrt{31}} \therefore \mu \leq 0,094\text{m}$$

Para a aerotriangulação CCTPP - 2007 - Altimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq 0,036 + 1,309 \cdot \frac{0,530}{\sqrt{31}} \therefore \mu \leq 0,161\text{m}$$

Para a aerotriangulação CCTPP - 2009 - Altimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq 0,079 + 1,309 \cdot \frac{0,567}{\sqrt{31}} \therefore \mu \leq 0,212\text{m}$$

Para a aerotriangulação CCTTG - 2009 - Altimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq -0,044 + 1,309 \cdot \frac{0,609}{\sqrt{31}} \therefore \mu \leq 0,099\text{m}$$

Para a aerotriangulação CCTAB - 2009 - Altimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq -0,150 + 1,309 \cdot \frac{0,316}{\sqrt{31}} \therefore \mu \leq -0,076\text{m}$$



## Apêndice 8 - Teste de Hipótese - de que a Média Planimétrica da População é Igual ou Menor que a Resolução do *Pixel* no Terreno - Câmara Kodak

O valor da estatística do teste de hipótese nula  $H_0 : \mu \leq 0,225$ . Se o valor calculado for inferior ao valor tabelado aceita-se a hipótese  $H_0$ . O teste de hipótese foi repetido para verificar se a média estimada da discrepância altimétrica é igual ou menor que a discrepância altimétrica esperada para a aerotriangulação realizada com a câmara Kodak.

Esses testes de hipótese foram aplicados em todas as amostras planimétricas e altimétricas obtidas em cada uma das aerotriangulações realizadas com a câmara Kodak.

Para a aerotriangulação CCTPP - 2006 - Planimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (0,210 - 0,225) \cdot \frac{\sqrt{31}}{0,093} \therefore t = -0,906$$

Para a aerotriangulação CCTPP - 2007 - Planimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (0,210 - 0,225) \cdot \frac{\sqrt{31}}{0,078} \therefore t = -1,046$$

Para a aerotriangulação CCTPP - 2009 - Planimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (0,208 - 0,225) \cdot \frac{\sqrt{31}}{0,086} \therefore t = -1,086$$

Para a aerotriangulação CCTTG - 2009 - Planimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (0,251 - 0,225) \cdot \frac{\sqrt{31}}{0,117} \therefore t = 1,262$$

Para a aerotriangulação CCTAB - 2009 - Planimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (0,186 - 0,225) \cdot \frac{\sqrt{31}}{0,081} \therefore t = -2,677$$

Para a aerotriangulação CCTPP - 2006 - Altimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (-0,083 - 0,588) \cdot \frac{\sqrt{31}}{0,752} \therefore t = -3,659$$

Para a aerotriangulação CCTPP - 2007 - Altimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (0,036 - 0,558) \cdot \frac{\sqrt{31}}{0,530} \therefore t = -4,490$$

Para a aerotriangulação CCTPP - 2009 - Altimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (0,079 - 0,588) \cdot \frac{\sqrt{31}}{0,567} \therefore t = -3,689$$

Para a aerotriangulação CCTTG - 2009 - Altimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (-0,044 - 0,588) \cdot \frac{\sqrt{31}}{0,609} \therefore t = -4,469$$

Para a aerotriangulação CCTAB - 2009 - Altimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (-0,150 - 0,588) \cdot \frac{\sqrt{31}}{0,316} \therefore t = -11,694$$

## Apêndice 9 - Teste de Normalidade Para os Parâmetros Recuperados da Geometria Projetiva da Câmara Sony DSC F828

O teste de normalidade foi realizado pela comparação entre coeficiente calculado pela equação (18), com o coeficiente tabelado (Anexo 01). Se o coeficiente tabelado for maior que o calculado, a hipótese nula é aceita, ou seja, a amostra veio de uma distribuição normal.

Na Tabela 38, estão os valores parciais obtidos para o cálculo do coeficiente de correlação do teste de normalidade de Filliben para a verificação da normalidade das amostras inerentes a distância focal da câmara Sony.

Tabela 38 - Valores parciais para o coeficiente de correlação de Filliben para a distância focal

Distância Focal						
Ordem	X	P(acu)	Z	X*Z	X <sup>2</sup>	Z <sup>2</sup>
1	7,348	0,0714	-1,4671	-10,7804	53,9946	2,1524
2	7,355	0,2143	-0,7919	-5,8244	54,1004	0,6270
3	7,359	0,3571	-0,3666	-2,6977	54,1505	0,1344
4	7,374	0,5000	0,0000	0,0000	54,3759	0,0000
5	7,385	0,6429	0,3666	2,7073	54,5367	0,1344
6	7,386	0,7857	0,7919	5,8486	54,5515	0,6270
7	7,388	0,9286	1,4671	10,8383	54,5766	2,1524
Σ	51,5945	3,5000	0,0000	0,0918	380,2863	5,8276

FONTE: O Autor.

Calculando o coeficiente de correlação pela utilização da equação (18), obteve-se o valor do coeficiente de 0,944. O valor do coeficiente tabela foi de 0,847. Esse valor foi obtido na Tabela (34) para o nível de confiança de 10% e 6 graus de liberdade.

Como o coeficiente de correlação tabelado ( $r_{tab} = 0,847$ ) foi menor que o coeficiente de correlação calculado ( $r_c = 0,944$ ), significa que a normalidade da amostra foi aceita na primeira etapa do teste.

A segunda etapa desse teste é a confecção do gráfico denominado de QQplot. O gráfico QQplot da distância para a análise da normalidade das amostras das distâncias focais da câmara Sony esta na Figura 35.

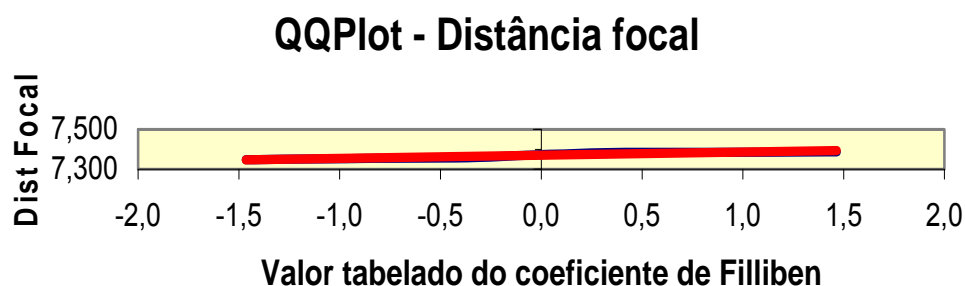


Figura 35 - Gráfico da curva QQPLOT para as distâncias focais - Câmara Sony  
FONTE: O Autor.

Verifica-se que o gráfico acima é praticamente uma reta, portanto, a amostra passou na segunda etapa do teste. Isso significa que segundo o teste de Filliben, a amostra possui uma distribuição normal.

Na Tabela 39, estão os valores parciais obtidos para o cálculo do coeficiente de correlação do teste de normalidade de Filliben para a verificação da normalidade das amostras inerentes ao afastamento do ponto principal no eixo x da câmara Sony.

Tabela 39 - Valores parciais para o coeficiente de correlação de Filliben para o afastamento do ponto principal no eixo x

Afastamento do ponto principal $x_0$						
Ordem	X	pacu	Z	X*Z	$X^2$	$Z^2$
1	-0,0477	0,0714	-1,4671	0,0700	0,0023	2,1524
2	-0,0251	0,2143	-0,7919	0,0199	0,0006	0,6270
3	-0,0181	0,3571	-0,3666	0,0066	0,0003	0,1344
4	-0,0177	0,5000	0,0000	0,0000	0,0003	0,0000
5	-0,0149	0,6429	0,3666	-0,0055	0,0002	0,1344
6	0,0034	0,7857	0,7919	0,0027	0,0000	0,6270
7	0,0046	0,9286	1,4671	0,0067	0,0000	2,1524
$\Sigma$	-0,1155	3,5000	0,0000	0,1005	0,0038	5,8276

FONTE: O Autor.

Calculando o coeficiente de correlação pela utilização da equação (18), obteve-se o valor do coeficiente de 0,956. O valor do coeficiente tabela foi de 0,847. Esse valor foi obtido na Tabela (31) para o nível de confiança de 10% e 6 graus de liberdade.

Como o coeficiente de correlação tabelado ( $r_{tab} = 0,847$ ) foi menor que o coeficiente de correlação calculado ( $r_c = 0,956$ ), significa que a normalidade da amostra foi aceita na primeira etapa do teste.

A segunda etapa desse teste é a confecção do gráfico denominado de QQplot. O gráfico QQplot da distância para a análise da normalidade das amostras das distâncias focais da câmara Sony está na Figura 36.

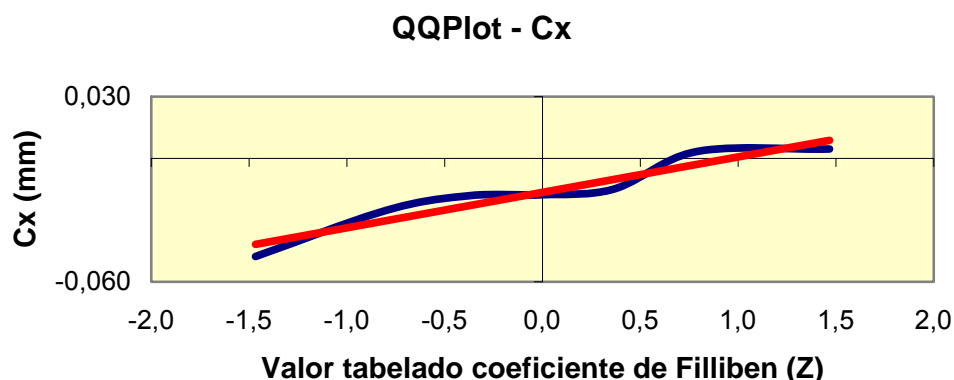


Figura 36 - Gráfico da curva QQPLOT para as distâncias focais - Câmara Sony  
FONTE: O Autor.

Verifica-se que o gráfico acima é praticamente uma reta, portanto, a amostra passou na segunda etapa do teste. Isso significa que segundo o teste de Filliben, a amostra possui uma distribuição normal.

Na Tabela 40 estão os valores parciais obtidos para o cálculo do coeficiente de correlação do teste de normalidade de Filliben para a verificação da normalidade das amostras inerentes ao afastamento do ponto principal no eixo "Y" da câmara Sony.

Tabela 40 - Valores parciais para o cálculo do coeficiente de correlação do teste de Filliben para o afastamento do ponto principal no eixo "Y "

Afastamento do ponto principal $y_0$						
Ordem	X	pacu	Z	X*Z	X <sup>2</sup>	Z <sup>2</sup>
1	-0,0089	0,0714	-1,4671	0,0131	0,0001	2,1524
2	-0,0035	0,2143	-0,7919	0,0028	0,0000	0,6270
3	-0,0031	0,3571	-0,3666	0,0011	0,0000	0,1344
4	-0,0001	0,5000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
5	0,0039	0,6429	0,3666	0,0014	0,0000	0,1344
6	0,0039	0,7857	0,7919	0,0031	0,0000	0,6270
7	0,0047	0,9286	1,4671	0,0069	0,0000	2,1524
Σ	-0,0031	3,5000	0,0000	0,0284	0,0002	5,8276

FONTE: O Autor.

Calculando o coeficiente de correlação pela utilização da equação (18), obteve-se o valor do coeficiente de 0,944. O valor do coeficiente tabela foi de 0,847.

Esse valor foi obtido na Tabela (31) para o nível de confiança de 10% e 6 graus de liberdade.

Como o coeficiente de correlação tabelado ( $r_{tab} = 0,847$ ) foi menor que o coeficiente de correlação calculado ( $r_c = 0,944$ ), significa que a normalidade da amostra foi aceita na primeira etapa do teste.

A segunda etapa desse teste, é a confecção do gráfico denominado de QQplot. O gráfico QQplot da distância para a análise da normalidade das amostras das distâncias focais da câmara Sony está na Figura 37.

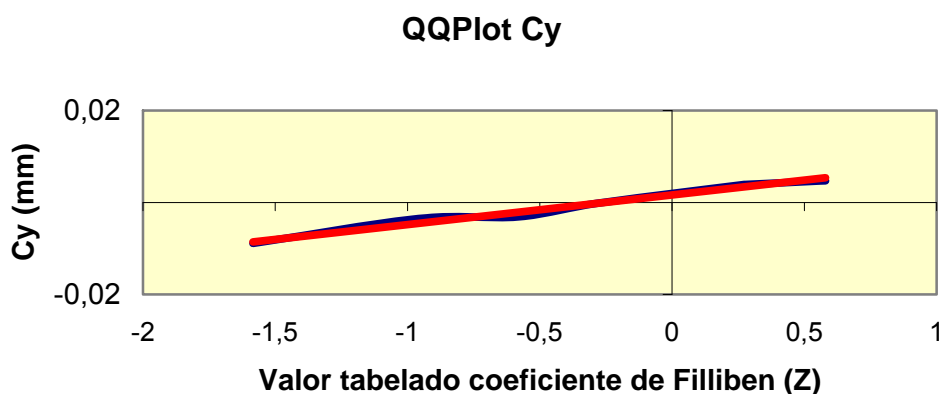


Figura 37 - Gráfico da curva QQPLOT para as distâncias focais - Câmara Sony  
FONTE: O Autor.

Verifica-se que o gráfico acima é praticamente uma reta, portanto, a amostra passou na segunda etapa do teste. Isso significa que segundo o teste de Filliben, a amostra possui uma distribuição normal.

## Apêndice 10 - Precisão Altimétrica Esperada Para as Aerotriangulações - Câmara Sony

O cálculo da precisão altimétrica esperada para as aerotriangulações realizadas com a câmara Sony foram realizados considerando a altitude de voo como sendo a média dos  $Z_0$ , a base fotogramétrica como a média das bases e a altitude do terreno como a média das altitudes dos alvos pré-sinalizados. Obteve-se  $Z_0 = 1190,942$  m,  $B = 74,88$  m e a altitude média =  $915,513$  m. Adotando a precisão de medida da paralaxe igual 1 *pixel* e aplicando a equação 08, tem-se:

$$dz = \pm \frac{H^2}{B \cdot f} d_{px} \therefore dz = \pm \frac{(1190,942 - 915,513)^2}{74,88 \cdot 0,007386} \cdot 2,7 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \therefore dz = \pm 0,741m$$

Apêndice 11 - Discrepâncias Obtidas Entre as Coordenadas Oriundas das Diversas Aerotriangulações Com as Determinadas por Levantamento Geodésico (GPS) - Câmara Sony

Tabela 41 - Cálculo das discrepâncias entre as coordenadas dos pontos de verificação obtidas com levantamento geodésico com as oriundas das diversas aerotriangulação - Câmara Sony

Pontos	P_8_1 N			P_9_1 N			P_9_2 N			P_9_3 N			P_9_1 A			G_9_1 N			B_9+1 N		
	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta h$ (m)
01	-0,03	0,07	0,40	-0,09	-0,06	0,17	-0,10	-0,08	0,06	-0,09	-0,12	0,14	-0,07	0,14	0,24	-0,07	0,12	0,26	-0,08	-0,10	0,15
02	-0,14	0,08	0,72	-0,12	0,03	-0,17	-0,16	0,02	-0,50	-0,11	0,01	-0,25	-0,15	0,12	0,39	-0,06	0,12	0,69	-0,14	0,01	-0,29
03	-0,16	0,15	0,23	-0,04	0,03	-0,70	-0,12	-0,01	-1,02	-0,03	0,05	-0,70	-0,26	0,08	-0,15	-0,04	0,20	0,45	-0,09	0,02	-0,90
04	0,11	0,16	0,96	-0,01	-0,05	0,62	-0,06	-0,06	0,54	0,02	-0,12	0,62	0,03	0,23	0,84	0,13	0,12	0,92	0,00	-0,07	0,63
05	0,03	0,08	0,05	-0,07	-0,11	-0,24	-0,14	-0,10	-0,38	-0,04	-0,17	-0,23	-0,05	0,16	-0,09	0,08	0,06	-0,03	-0,09	-0,12	-0,25
11	-0,07	0,02	0,76	-0,15	-0,16	0,43	-0,22	-0,17	0,28	-0,11	-0,23	0,42	-0,15	0,11	0,56	0,00	0,02	0,64	-0,16	-0,18	0,40
12	0,09	0,05	-0,18	0,01	-0,10	-0,16	0,01	-0,11	-0,21	0,03	-0,13	-0,14	0,08	0,09	-0,22	0,05	0,00	-0,08	0,01	-0,12	-0,14
13	-0,07	0,19	0,20	-0,16	0,03	0,04	-0,17	0,04	-0,03	-0,15	0,00	0,07	-0,10	0,24	0,16	-0,10	0,13	0,31	-0,15	0,02	0,06
14	-0,05	-0,13	0,42	0,02	-0,23	-0,68	-0,05	-0,25	-0,99	0,02	-0,23	-0,71	-0,08	-0,14	0,26	0,11	-0,12	0,72	-0,03	-0,24	-0,82
16	-0,17	-0,12	0,74	-0,17	-0,16	-0,05	-0,22	-0,17	-0,35	-0,17	-0,18	-0,13	-0,19	-0,08	0,43	-0,13	-0,07	0,65	-0,20	-0,18	-0,16
17	-0,12	-0,01	0,46	-0,14	-0,06	-0,15	-0,18	-0,08	-0,34	-0,13	-0,10	-0,14	-0,14	0,03	0,20	-0,10	0,03	0,33	-0,15	-0,09	-0,22
18	-0,13	0,05	0,52	-0,16	-0,03	0,06	-0,19	-0,04	-0,18	-0,15	-0,08	0,04	-0,15	0,08	0,30	-0,12	0,08	0,40	-0,17	-0,05	-0,01
20	0,02	0,17	0,63	0,12	0,09	-0,49	0,05	0,06	-0,90	0,12	0,11	-0,55	-0,02	0,14	0,32	0,15	0,23	0,83	0,08	0,08	-0,69
22	-0,22	0,13	0,58	-0,14	0,06	-0,58	-0,19	0,03	-0,99	-0,13	0,08	-0,61	-0,26	0,12	0,25	-0,10	0,19	0,77	-0,18	0,05	-0,75
24	-0,18	0,16	0,36	-0,09	0,10	-0,71	-0,14	0,08	-1,08	-0,09	0,11	-0,74	-0,20	0,16	0,09	-0,06	0,22	0,54	-0,13	0,08	-0,87
25	-0,12	0,16	0,52	-0,03	0,11	-0,58	-0,09	0,08	-0,96	-0,04	0,11	-0,63	-0,14	0,16	0,22	-0,01	0,24	0,67	-0,07	0,09	-0,73
26	0,28	0,10	-0,53	0,00	0,04	0,11	-0,04	-0,04	0,28	0,02	-0,02	-0,05	0,21	0,11	-0,12	0,26	0,14	-0,48	-0,01	-0,03	0,15
27	0,06	0,17	-0,41	-0,24	0,08	0,33	-0,27	0,05	0,44	-0,22	0,04	0,17	-0,02	0,16	0,09	0,02	0,18	-0,28	-0,24	0,03	0,37
28	0,07	0,04	0,57	0,09	0,00	-0,18	0,05	-0,02	-0,49	0,11	-0,02	-0,20	0,06	0,10	0,22	0,14	0,12	0,45	0,08	-0,02	-0,27
29	-0,03	-0,04	0,50	-0,02	-0,08	-0,22	-0,05	-0,11	-0,54	-0,01	-0,11	-0,31	-0,02	0,00	0,20	0,07	0,01	0,47	-0,04	-0,11	-0,36



Pontos	P_8_1 N			P_9_1 N			P_9_2 N			P_9_3 N			P_9_1 A			G_9_1 N			B_9+1 N		
	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta h$ (m)	$\Delta E$ (m)	$\Delta N$ (m)	$\Delta h$ (m)
30	0,09	0,20	-0,74	-0,08	-0,07	-0,09	-0,03	-0,04	-0,20	-0,03	-0,07	-0,12	0,03	0,21	-0,58	-0,02	0,08	-0,41	-0,02	-0,03	-0,19
31	-0,22	0,13	0,03	-0,29	-0,02	0,00	-0,29	-0,02	-0,05	-0,28	-0,05	0,01	-0,22	0,18	-0,15	-0,25	0,08	0,03	-0,29	-0,03	0,00
33	0,05	0,16	-0,13	-0,04	0,01	-0,28	-0,04	0,01	-0,36	-0,01	-0,01	-0,28	0,01	0,21	-0,24	-0,01	0,11	-0,10	-0,02	0,01	-0,33
34	0,06	0,17	0,70	-0,08	-0,03	0,39	-0,13	-0,04	0,27	-0,03	-0,09	0,39	-0,03	0,25	0,57	0,08	0,15	0,66	-0,06	-0,05	0,37
36	0,08	0,18	0,20	-0,05	-0,02	-1,09	-0,11	-0,03	-0,11	-0,01	-0,11	0,03	-0,02	0,29	-0,02	0,11	0,19	0,05	-0,05	-0,05	0,00
37	0,02	0,11	1,02	-0,06	-0,02	0,69	-0,08	-0,03	0,64	-0,04	-0,05	0,69	-0,03	0,14	0,96	-0,03	0,07	1,11	-0,05	-0,03	0,68
44	-0,13	0,22	0,38	-0,12	0,18	-0,74	-0,21	0,16	-1,08	-0,11	0,20	-0,77	-0,17	0,18	0,17	0,03	0,25	0,79	-0,17	0,17	-0,92
46	-0,06	-0,03	0,68	-0,04	-0,07	-0,54	-0,13	-0,11	-0,96	-0,04	-0,06	-0,56	-0,11	-0,07	0,38	0,10	-0,01	1,05	-0,09	-0,09	-0,73
$\bar{X}$	-0,03	0,09	0,34	-0,08	-0,02	-0,17	-0,12	-0,04	-0,33	-0,06	-0,04	-0,16	-0,08	0,12	0,19	0,01	0,11	0,41	-0,09	-0,04	-0,21
$\sigma$	0,12	0,10	0,43	0,09	0,09	0,44	0,09	0,09	0,53	0,09	0,11	0,40	0,11	0,10	0,33	0,11	0,09	0,43	0,09	0,09	0,47
M	0,28	0,22	1,02	0,12	0,18	0,69	0,05	0,16	0,64	0,12	0,20	0,69	0,21	0,29	0,96	0,26	0,25	1,11	0,08	0,17	0,68
m	-0,22	-0,13	-0,74	-0,29	-0,23	-1,09	-0,29	-0,25	-1,08	-0,28	-0,23	-0,77	-0,26	-0,14	-0,58	-0,25	-0,12	-0,48	-0,29	-0,24	-0,92

Onde:

P- Número do ponto de verificação;

$\sigma$  - Desvio padrão em metro;

m - Mínima discrepância observada em metro.

$\bar{X}$  - Média em metro,

M - Máxima discrepância observada em metro

FONTE: O Autor.

## Apêndice 12 - Limite Superior da Média da População dos Erros Planimétricos e Altimétricos - Câmara Sony

Com base na média e desvio padrão da amostra foi calculada a média estimada da população para os erros planimétricos e altimétricos. Esses erros foram obtidos pela diferença entre as coordenadas dos pontos de verificação obtidas com GPS e as coordenadas dos pontos de verificação calculadas nas diversas aerotriangulações realizadas com a câmara Sony.

Para a aerotriangulação P\_8\_1 N - Planimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq 0,17 + 1,313 \cdot \frac{0,07}{\sqrt{28}} \therefore \mu \leq 0,19m$$

Para a aerotriangulação P\_9\_1 N - Planimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq 0,13 + 1,313 \cdot \frac{0,07}{\sqrt{28}} \therefore \mu \leq 0,15m$$

Para a aerotriangulação P\_9\_2 N - Planimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq 0,16 + 1,313 \cdot \frac{0,08}{\sqrt{28}} \therefore \mu \leq 0,18m$$

Para a aerotriangulação P\_9\_3 N - 2009 - Planimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq 0,14 + 1,313 \cdot \frac{0,07}{\sqrt{28}} \therefore \mu \leq 0,16$$

Para a aerotriangulação P\_9\_1 A - Planimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq 0,20 + 1,313 \cdot \frac{0,06}{\sqrt{28}} \therefore \mu \leq 0,21m$$

Para a aerotriangulação G\_9\_1 N - Planimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq 0,16 + 1,313 \cdot \frac{0,07}{\sqrt{28}} \therefore \mu \leq 0,18m$$

Para a aerotriangulação B\_9\_1 N - Planimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq 0,14 + 1,313 \cdot \frac{0,07}{\sqrt{28}} \therefore \mu \leq 0,16m$$

Para a aerotriangulação P\_8\_1 N - Altimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq 0,34 + 1,313 \cdot \frac{0,43}{\sqrt{28}} \therefore \mu \leq 0,44m$$

Para a aerotriangulação P\_9\_1 N - Altimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq -0,17 + 1,313 \cdot \frac{0,44}{\sqrt{28}} \therefore \mu \leq -0,06m$$

Para a aerotriangulação P\_9\_2 N - Altimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq -0,33 + 1,313 \cdot \frac{0,53}{\sqrt{28}} \therefore \mu \leq -0,20m$$

Para a aerotriangulação P\_9\_3 N - Altimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq -0,16 + 1,313 \cdot \frac{0,40}{\sqrt{28}} \therefore \mu \leq -0,06m$$

Para a aerotriangulação P\_9\_1 A - Altimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq 0,19 + 1,313 \cdot \frac{0,33}{\sqrt{28}} \therefore \mu \leq 0,27m$$

Para a aerotriangulação G\_9\_1 N - Altimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq 0,41 + 1,313 \cdot \frac{0,43}{\sqrt{28}} \therefore \mu \leq 0,51m$$

Para a aerotriangulação B\_9\_1 N - Altimetria

$$\mu \leq \bar{x} + t_{\alpha} \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \therefore \mu \leq -0,21 + 1,313 \cdot \frac{0,47}{\sqrt{28}} \therefore \mu \leq -0,10m$$

### Apêndice 13 - Cálculo da Estatística do Teste "t" Para a Hipótese Nula $H_0 : \mu \leq 0,20$

#### Para os Erros Planimétricos e Altimétricos - Câmara Sony

A seguir são apresentados os cálculos da estatística do teste de hipótese, que verifica se a média do erro planimétrico, obtida da população, é igual ou menor que a resolução do *pixel* no terreno.

O teste de hipótese foi repetido para verificar se a média estimada da discrepância altimétrica é igual ou menor que a discrepância altimétrica esperada para a aerotriangulação realizada com a câmara Sony.

Esses testes de hipótese foram aplicados em todas as amostras planimétricas e altimétricas obtidas em cada uma das aerotriangulações realizadas com a câmara Kodak.

#### Para a aerotriangulação P\_8\_1 N - Planimetria

$$t = \left( \bar{x} - \mu_0 \right) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (0,19 - 0,20) \cdot \frac{\sqrt{28}}{0,07} \therefore t = -0,978$$

#### Para a aerotriangulação P\_9\_1 N - Planimetria

$$t = \left( \bar{x} - \mu_0 \right) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (0,15 - 0,20) \cdot \frac{\sqrt{28}}{0,07} \therefore t = -4,001$$

#### Para a aerotriangulação P\_9\_2 N - Planimetria

$$t = \left( \bar{x} - \mu_0 \right) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (0,18 - 0,20) \cdot \frac{\sqrt{28}}{0,08} \therefore t = -1,356$$

#### Para a aerotriangulação P\_9\_3 N - Planimetria

$$t = \left( \bar{x} - \mu_0 \right) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (0,16 - 0,20) \cdot \frac{\sqrt{28}}{0,07} \therefore t = -3,245$$

#### Para a aerotriangulação P\_9\_1 A - Planimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (0,21 - 0,20) \cdot \frac{\sqrt{28}}{0,06} \therefore t = -1,290$$

Para a aerotriangulação G\_9\_1 N - Planimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (0,18 - 0,20) \cdot \frac{\sqrt{28}}{0,07} \therefore t = -1,734$$

Para a aerotriangulação B\_9\_1 N - Planimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (0,16 - 0,20) \cdot \frac{\sqrt{28}}{0,07} \therefore t = -3,245$$

Para a aerotriangulação P\_8\_1 N - Altimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (0,44 - 0,74) \cdot \frac{\sqrt{28}}{0,43} \therefore t = -3,644$$

Para a aerotriangulação P\_9\_1 N - Altimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (-0,06 - 0,74) \cdot \frac{\sqrt{28}}{0,44} \therefore t = -9,666$$

Para a aerotriangulação P\_9\_2 N - Altimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (-0,20 - 0,74) \cdot \frac{\sqrt{28}}{0,53} \therefore t = -9,403$$

Para a aerotriangulação P\_9\_3 N - Altimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (-0,06 - 0,74) \cdot \frac{\sqrt{28}}{0,40} \therefore t = -10,629$$

Para a aerotriangulação P\_9\_1 A - Altimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (0,27 - 0,74) \cdot \frac{\sqrt{28}}{0,33} \therefore t = -7,545$$

Para a aerotriangulação G\_9\_1 N - Altimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (0,51 - 0,74) \cdot \frac{\sqrt{28}}{0,43} \therefore t = -2,783$$

Para a aerotriangulação B\_9\_1 N - Altimetria

$$t = (\bar{x} - \mu_0) \cdot \frac{\sqrt{n}}{s} \therefore t = (-0,10 - 0,74) \cdot \frac{\sqrt{28}}{0,47} \therefore t = -9,417$$